

Т. А. СЕЛИХОВА (ДИИТ)

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ОСНОВАНИЯ В ВИДЕ СЛОЯ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МКЭ

Наведено результати дослідження моделі основи у вигляді шару кінцевої товщини за допомогою метода скінченних елементів, а також авторські теоретичні та практичні рекомендації.

Представлены результаты исследования модели основания в виде слоя конечной толщины с помощью метода конечных элементов (МКЭ), а также авторские теоретические и практические рекомендации.

In the article the results of research of bases model as the layer of eventual thickness by the finite elements method has been represented, and also author theoretical and practical recommendations are resulted.

Одним из важных теоретических и практических вопросов исследования деформированного состояния основания под нагрузкой от фундамента является определение границ расчетной области или модели. Практическим аспектом такого определения является возможность упрощения решения задачи вследствие отбрасывания части грунтового массива, который не участвует в деформировании и, следовательно, его влиянием можно пренебречь. Теоретическим аспектом данного вопроса является адекватное отражение взаимодействия в системе «сооружение–основание», которое напрямую связано с выбором модели основания. Анализ моделей основания позволяет сделать вывод, что наиболее обоснованно к вопросу определения осадок подходят теоретические построения, относящиеся к модели упругого слоя конечной толщины [1; 2] и его расширенных модернизаций (упруго-пластический слой, упругоползучий [3; 4]), основанных на этих положениях. Ориентируясь на решение задачи определения (НДС) системы «сооружение–основание» МКЭ следует отметить, что модель упругого слоя или, точнее, слоя с некоторыми свойствами (далее – модель слоя), адекватно подходит для реализации практических алгоритмов метода. Модель основания в виде полупространства менее всего подходит для решения задачи о НДС МКЭ, так как область расчета нерационально увеличивается, что приводит к усложнению расчета но не дает ощутимых результатов в точности решения, а следовательно, негативно влияет на исследование системы.

Одним из отрицательных аспектов модели слоя с некоторыми свойствами является нали-

чие выбора расчетных характеристик расчетной области таким образом, чтобы выбранные размеры не влияли на результаты расчета. Модель слоя, реализованная МКЭ в виде объемной расчетной области с размерами $a \times b \times h$, где a , b , h – ширина, длина и толщина (мощность) расчетной области должны иметь такие их размеры, которые не влияли бы на перемещения и напряжения негативным образом, то есть не изменяли бы эти параметры. По аналогии с компрессионным прибором, в котором действительное напряженное состояние реализуется лишь в центре обоймы [5], а влияние ее стенок слишком велико на окрестные точки грунтового образца, так и в модели слоя МКЭ следует учесть возможное возникновение такой ситуации. Избежать ее можно путем увеличения размеров расчетной области. Следует отметить, что увеличение размеров области в плане $a \times b$ также связано с изменением размера h (толщина модели), что напрямую аналогично определению толщины слоя, описанное многими исследователями [2; 6; 7]. Но предложенные этими авторами способы определения толщины слоя как активной области сжатия (по Флорину [7]), суммирования осадок (по Егорову [6]) или затухания напряжений от фундамента (по СНиП [8]) несколько усложнены. Предложенный Флорином способ определения активной глубины, как глубины, при которой пренебрежение сжатия более глубоко расположенных слоев приводит к возникновению расчетной погрешности, недостаточно обоснован в силу произвольности некоторых применяющихся в нем величин:

$$h_{\text{ак}} = \sqrt{\frac{3 + \nu}{1 - \nu^2}} \cdot \frac{PA}{4\pi(1 + \varepsilon^*)} \cdot \frac{1 + 2\varepsilon}{1 - 2\nu_0} \cdot \frac{1}{\gamma \Delta S}, \quad (1)$$

где P – равнодействующая нагрузки; A – площадь действия силы; ν – коэффициент Пуассона, $\nu_0 = \nu$; ε – аппроксимация паспорта прочности грунта, в данном случае $\varepsilon = -A \cdot \ln \sigma + c$; $\varepsilon^* = 0,75$ (берется произвольно). В решенном примере [7], автор определяет глубину с заданной погрешностью 1 см в 302 м, что не может применяться для практических расчетов. Более реально применение способа суммирования осадок или предложенный в [1] способ определения активной глубины сжатия, как глубины, на которой напряжения от внешней нагрузки составляют 10...20 % от бытовых напряжений [8].

Переосмыслив способы определения толщины слоя в рамках МКЭ, автор предлагает практический способ ее определения путем итерационного процесса уменьшения расчетной области. Причем, помимо определения толщины слоя h , из-за использования пространственной постановки, следует определять размеры области в плане $a \times b$, так как их изменение также влияет на результаты расчета. Практически итерационный процесс сводится к подбору такой области, в которой удовлетворены следующие условия (рис. 1):

$$\left. \begin{aligned} -a \leq x \leq a, \quad \sigma_x = 0 \quad \sigma_x^y = \nu \gamma H \cdot \xi_\sigma \\ -b \leq y \leq b \quad \sigma_y = 0 \quad \sigma_y^y = \nu \gamma H \cdot \eta_\sigma \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

$$z \leq h \quad \sigma_z \leq 0 \quad \sigma_z^y = \gamma H \cdot \lambda_\sigma, \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} -a \leq x \leq a, \quad \varepsilon_x \leq \xi_\varepsilon \\ -b \leq y \leq b \quad \varepsilon_y \leq \eta_\varepsilon \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

$$z \leq h \quad \varepsilon_z \leq \lambda_\varepsilon, \quad (5)$$

где a, b, h – соответственно ширина, длина и высота расчетной области; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – компоненты напряженного состояния от внешней нагрузки на расчетную область; $\sigma_x^y, \sigma_y^y, \sigma_z^y$ – компоненты напряженного состояния от собственного веса; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – компоненты деформированного состояния от внешней нагрузки; x, y, z – переменная координата; $\xi_\sigma, \eta_\sigma, \lambda_\sigma, \xi_\varepsilon, \eta_\varepsilon, \lambda_\varepsilon$ – некоторые коэффициенты.

Представленные неравенства (2)–(3) показывают, что на границах области $a \times b$ и по ограниченной толщине h напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ от внешней нагрузки должны быть равны нулю, то есть распространение напряжения от нагрузки в основании не должно быть запрещено из-за размеров модели и на границах модели их влияние должно быть минимальным. Причем напря-

женное состояние на границах модели должно наиболее соответствовать компонентам бытового, то есть коэффициенты $\xi_\sigma, \eta_\sigma, \lambda_\sigma$ должны быть близки к единице.

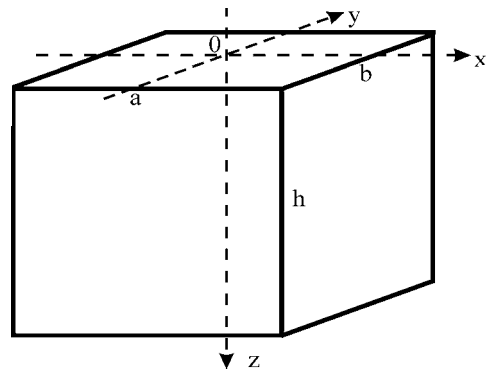


Рис. 1. Схема обозначений расчетной области

Неравенства (4)–(5) свидетельствуют о требовании затухания перемещений $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ от нагрузки на границах модели, причем коэффициенты $\xi_\varepsilon, \eta_\varepsilon, \lambda_\varepsilon$ в идеальном случае равны нулю (но не в случае действия собственного веса), а в некотором приближении равны сотым частям миллиметра, что доказывает незначительное влияние изменения деформированного состояния на результаты расчета.

Проведен ряд численных расчетов для выяснения изменения НДС от размеров расчетной области. Для достаточного анализа и поиска зависимости изменения параметров напряжений и перемещений использованы три модели основания с вариацией расчетной области. Расчетные случаи обозначены следующим образом:

Серия № 1. Расчетная область $8 \times 8 \times 8$ м. Разбиение на конечные элементы $-0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м. КЭ объемного типа, общее количество – 4096 штук, деформативные характеристики КЭ соответствуют супеси твердой со значением модуля упругости 21100 кН/м^3 и коэффициентом Пуассона, равным 0,3. В некоторых загрузениях участвовал собственный вес, равный 20 кН/м^3 .

Серия № 2. Расчетная область $10 \times 10 \times 10$ м. Во всех сериях разбиение на конечные элементы сохранялось, общее количество конечных элементов – 8000 штук.

Серия № 3. Расчетная область $12 \times 12 \times 12$ м. Общее количество конечных элементов – 13824 штуки. Все характеристики элементов для всех серий являются постоянными, что дает возможность говорить о неизменности параметров численного анализа, и полученные вариации результатов зависят лишь от размеров расчетной области.

Следует отметить, что расчет велся на разнобразный спектр загрузений, причем их зна-

чения во всех трех сериях были одинаковыми, что также свидетельствует о постоянных условиях численного анализа. Ниже приведен список загрузок (нелинейная постановка):

- 1 загрузка – центральная сила в центре расчетной области, равная 100 кН;
- 2 загрузка – центральная сила в центре расчетной области, равная 100 кН, с совместным действием собственного веса;

- 3 загрузка – распределенная сила в центре расчетной области, равная 10 кН/м, площадь действия 3×3 м;

- 4 загрузка – распределенная сила в центре расчетной области, равная 10 кН/м, площадь действия 3×3 м с совместным действием собственного веса;

На рис. 2–5 показаны результаты численного анализа трех серий.

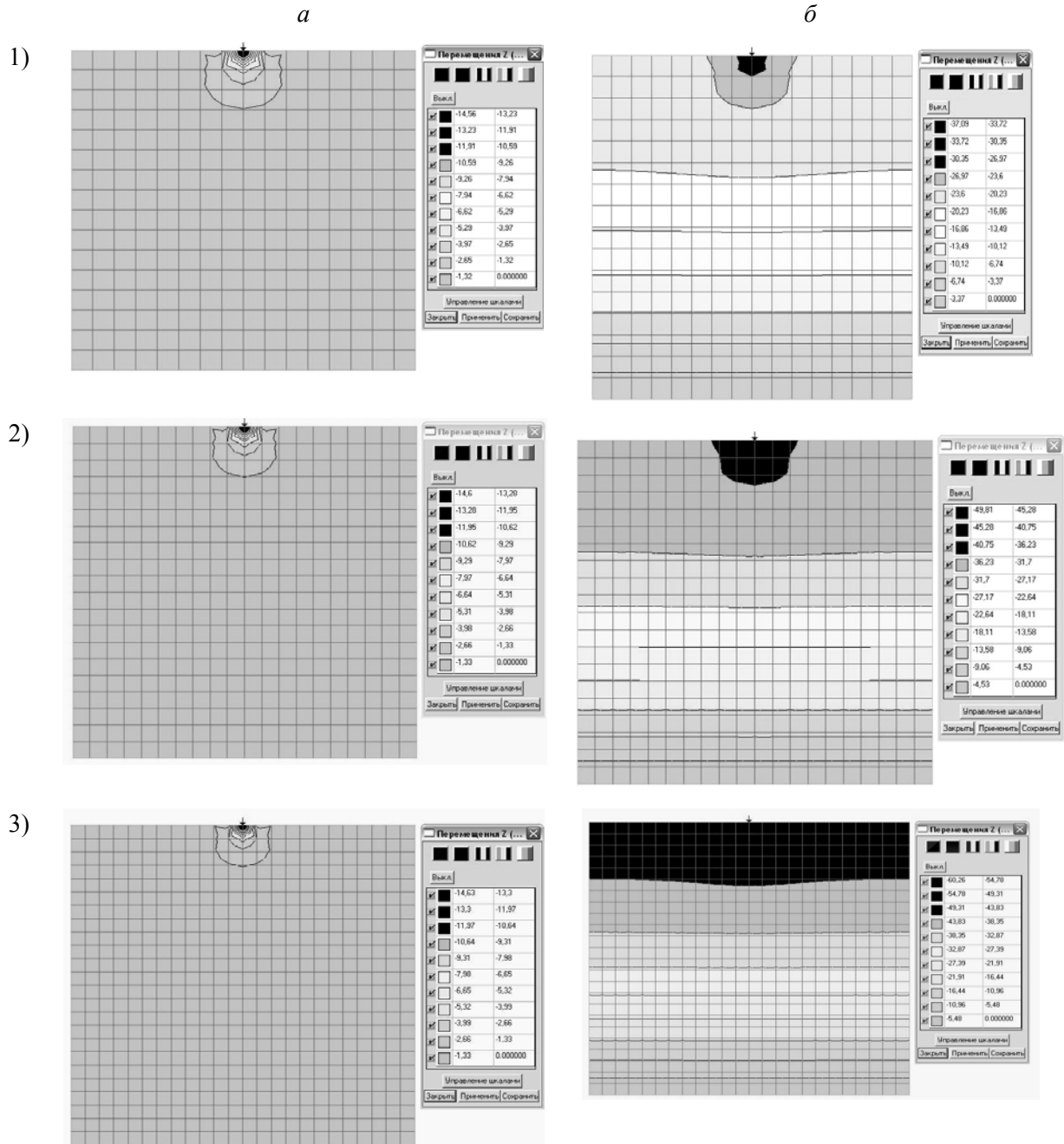


Рис. 2. Изолинии и изополя перемещений по вертикальной оси:
 а) – (загрузка 1); б) – (загрузка 2); 1) серия № 1; 2) серия № 2; 3) серия № 3

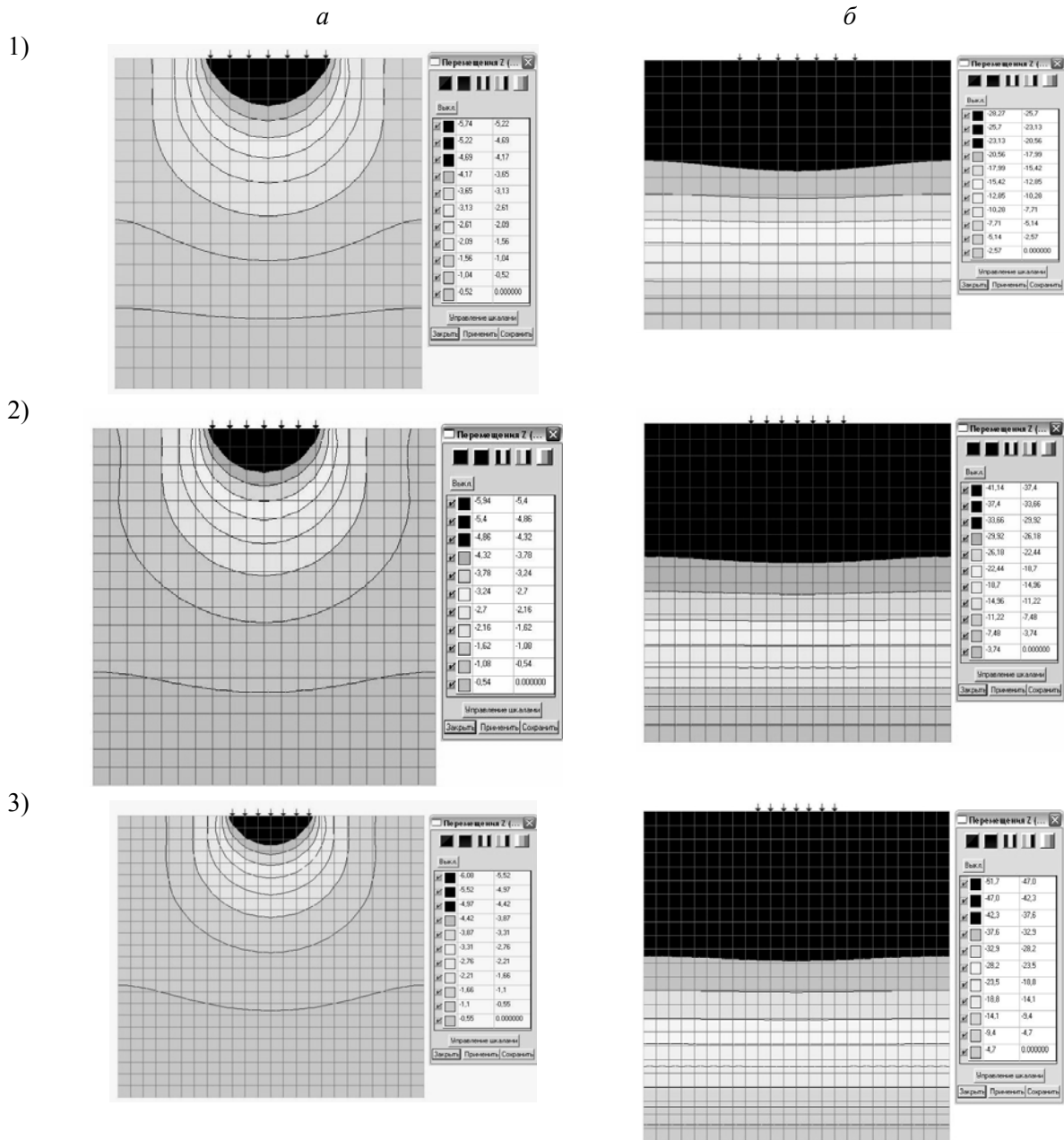


Рис. 3. Изолинии и изополя перемещений по вертикальной оси:
а) – (загружение 3); *б)* – (загружение 4); 1) серия № 1; 2) серия № 2; 3) серия № 3

Анализируя распределение вертикальных перемещений на рис. 2 и 3, можно сделать вывод, что увеличение расчетной области незначительно влияет на распределение перемещений (десятые доли процента), а значительное изменение перемещений связано с переходом от одного нагружения к другому. В данном показательном примере перемещения от силы со значением в 100 кН (данное значение взято лишь для показательности результатов без стремления к какому-либо конкретному случаю) сильно изменились по сравнению со случаем совместного действия силы и собственного веса (в шесть раз). Следует отме-

тить, что в случае совместного действия силы и собственного веса (см. рис. 2, б) изменение перемещений более показательно, причем несколько изменился и характер изолиний и изополей данного параметра. Но эти изменения изополей сильнее проявляются в зоне действия силы, чем во всей расчетной области, что может быть объяснено значительным влиянием нелинейности постановки и, как следствие, влиянием пластических деформаций в зоне под силой. Следует также отметить, что в сериях № 2 и № 3 изменения перемещений не выходят за пределы 20 %, и зоны, в которых изменения этого параметра значи-

тельны, невелики по площади. Данные изменения могут также быть объяснены с позиции невысокой адекватности применяемой модели, которая, впрочем, применяется повсеместно, даже в некоторых классических задачах теории упругости. Речь идет о взаимодействии некоторого тела с сосредоточенной силой, например, в задаче Буссинеска, если принять Z в формуле равным нулю, тогда напряжения в этой точке равны бесконечности, что не отвечает физическим законам действительности. Но не следует забывать, что сосредоточенная сила – это значительная идеализация, и в дей-

ствительности нет сил, которые не имели бы площади действия. Это доказывают результаты анализа случая распределенной нагрузки (рис. 3, а, б), которые свидетельствуют о незначительном изменении перемещений в зависимости от размеров расчетной области (не более 30 % в сериях № 2 и 3). Но и это изменение захватывает незначительные площади, и там, где действие распределенной нагрузки становится незначительным, а главным фактором возникновения деформируемого состояния становится собственный вес (рис. 3, б) оно стремится к нулю.

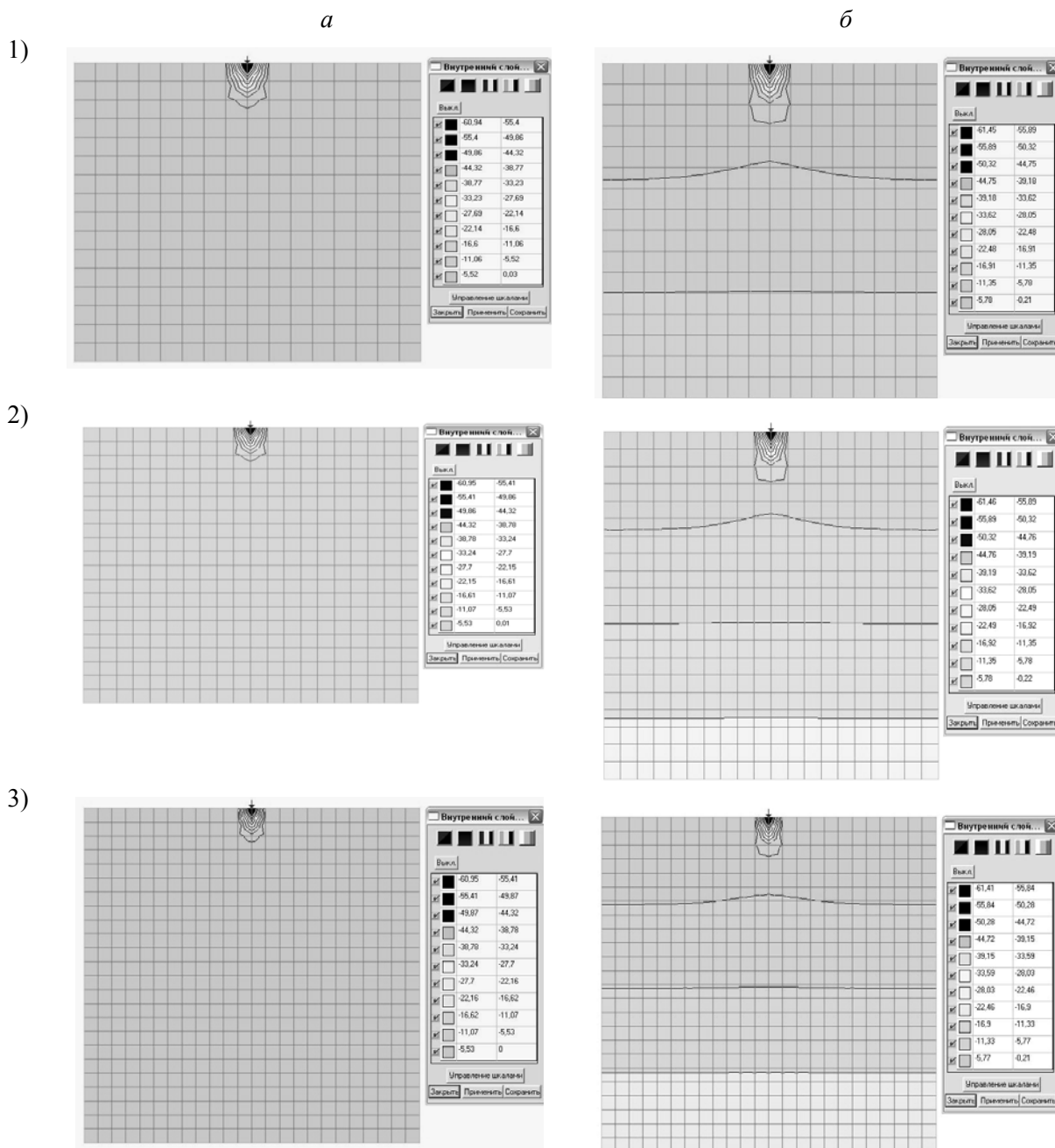


Рис. 4. Изолинии и изополя главных напряжений по вертикальной оси: а) – (загружение 1); б) – (загружение 2); 1) серия № 1; 2) серия № 2; 3) серия № 3

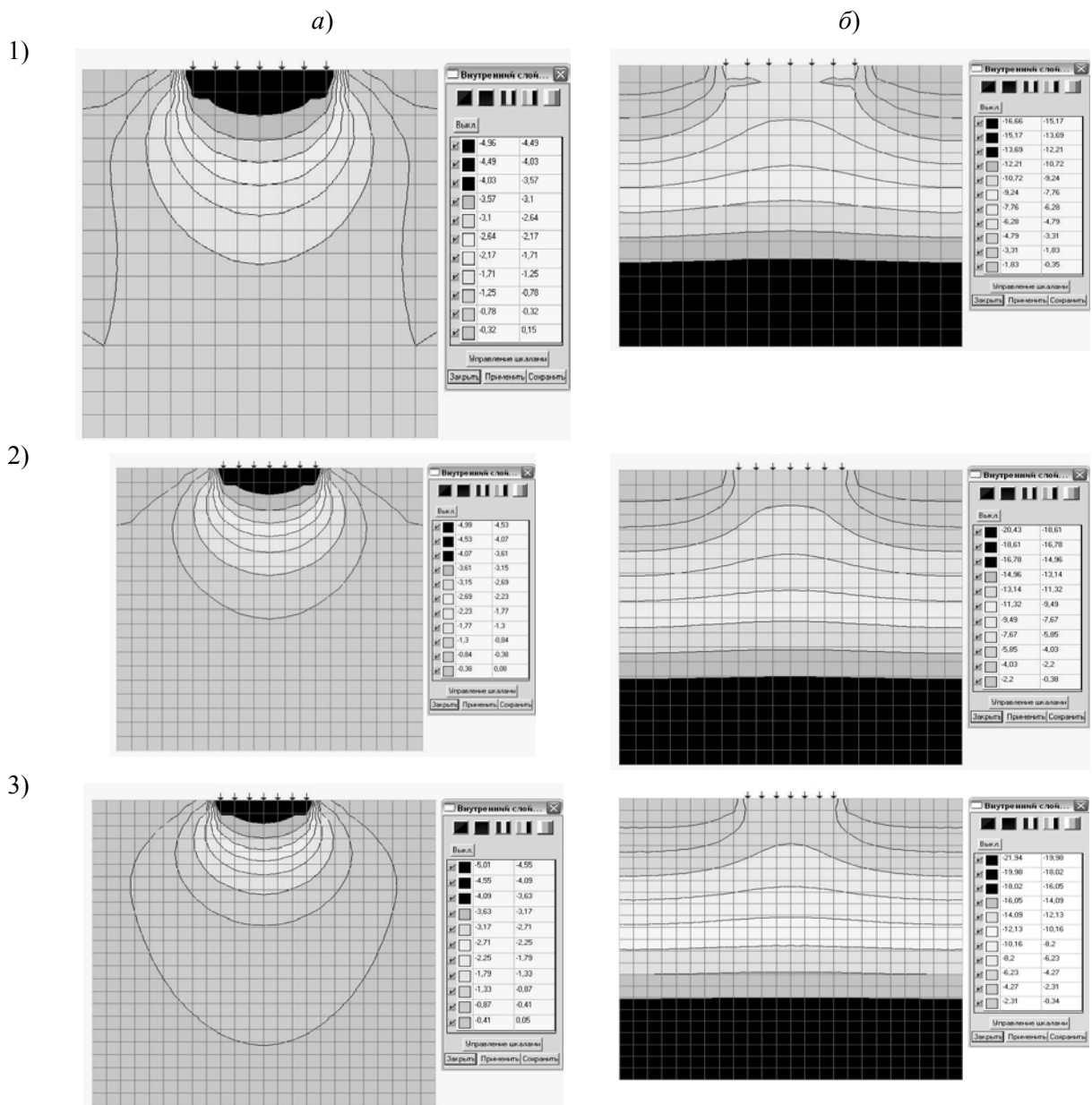


Рис. 5. Изолинии и изополя главных напряжений по вертикальной оси:
 а) – (загрузка 3); б) – (загрузка 4); 1) серия № 1; 2) серия № 2; 1) серия № 3

Результаты, полученные с помощью расчетной области серии № 1 ($8 \times 8 \times 8$ м), действительно не слишком адекватны, так как относительные ошибки перемещений в сравнении с другими сериями значительны, что не соответствует уравнениям (2)–(5), но следует подчеркнуть, что эти ошибки достаточно велики в случае совместного действия внешней нагрузки и собственного веса. Относительные ошибки в двух других сериях не столь велики, что объясняется меньшим влиянием краевых эффектов. В случае напряжений данные ошибки еще меньше (рис. 4 а, б), причем вне зависимости от загрузки, что свидетельствует о более сильном влиянии на общее НДС собственного веса,

действие которого сглаживает действие силы, хотя пластическая составляющая напряжений от действия силы, конечно же, не уменьшается.

Результаты анализа напряжений (рис. 5) наиболее полно доказывают, что расчетная область серии № 1 в случае распределенной нагрузки, которая занимает до 40 % расчетной области (площадь действия распределенной нагрузки 3×3 метра), недостаточно адекватна для получения более точных результатов. Это доказывает характер изолиний (рис. 5 а, б), которые в серии № 1 незамкнуты, что противоречит физическому смыслу и объясняется недостаточным объемом расчетной области, который требуется для развития полной картины напря-

жений. Как видно из рисунка, серия № 2 также несколько не отвечает этому требованию, хотя последняя незамкнутая изолиния не вносит значительной погрешности в общую картину напряжений, так как имеет незначительную напряженность (0,16-0,08 кН/м³). В случае совместного действия распределенной нагрузки и собственного веса относительная погрешность серий № 2 и 3 составляет 5...7 %, что говорит об их равнозначности.

Особенным аспектом исследования модели конечного слоя при ее реализации с помощью МКЭ следует выделить определение толщины этого слоя, то есть одного из геометрических размеров расчетной области. Выше уже было показано, что определение этого параметра затруднено в силу несистематизированности положений его отыскания. Предложенные автором положения отыскания данного параметра с помощью уравнений (2)–(5), а точнее уравнения (5) носят скорее практический характер, то есть они отличаются некоторой эмпиричностью, которая, впрочем, обоснована в данном случае недостаточными знаниями об определении толщины расчетного слоя. Представленные выше результаты расчетов трех серий (рис. 2–5) могут служить иллюстрацией использования уравнения (5) при поиске данного параметра. Алгоритм поиска складывается из создания расчетных областей с конкретными вариантами загрузок и проверкой их с помощью уравнения (5). Те расчетные области, в которых данное условие не выполняется, отбрасываются. Расчетные области, в которых кроме условия (5), выполняются условия (2)–(4), а также которые возможно рассчитать на ПЭВМ, принимаются к расчету. Как видно из простого алгоритма поиска толщины конечного слоя его достаточно сложно привести к функциональному виду, то есть сложно найти систему, которая структурирует взаимодействие между толщиной конечного слоя и размерами расчетной области. Данный вопрос сложен и требует дополнительных исследований, которые достаточно сложно провести в рамках данной работы.

Следует также отметить некоторые особенности представленного алгоритма, а именно, поиск толщины слоя (высоты модели) следует вести на расчетной области без учета действия собственного веса. Это обусловлено тем, что собственный вес будет вносить в расчет значительную погрешность, так как его воздействие будет вызывать значительные перемещения, что доказывают результаты расчетов, представленные выше. Поиск толщины конечного слоя обусловлен поиском границ действия внешней нагрузки, что, кстати, не противоречит существующим нормам [8]. Помимо данного замечания следует также заметить, что влияние деформативных параметров основания в каждом конкретном случае значительно и в дальнейшем данный вопрос также предстоит разрабатывать.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Далматов Б. И. Практический расчет осадки фундамента методом ограниченной сжимаемой толщи. – Л.: Изд-во ЛДНТП, 1965. – 32 с.
2. Шелест Л. А. Распределение напряжений и перемещений в основании конечной толщины под круглым жестким фундаментом // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1975. – № 6. – С. 26–28.
3. Уваров Б. В. Расчет балок на упругом основании с учетом ползучести и возможности отрыва балки от грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1980. – № 4. – С. 24–26.
4. Клепиков С. Н. Расчет сооружений на деформируемом основании. – К.: НИИСК, 1996. – 202 с.
5. Гольдштейн М. Н. Механика грунтов, основания и фундаменты / М. Н. Гольдштейн, А. А. Царьков, И. И. Черкасов. – М.: Транспорт, 1981. – 320 с.
6. Егоров К. Е. К вопросу деформации оснований конечной толщины // Труды НИИ оснований. – М.: Госстройиздат, 1958. – № 34. – С. 5–33.
7. Флорин В. А. Основы механики грунтов, т. 1. – Л.–М.: Госстройиздат, 1961. – 357 с.
8. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1995. – 26 с.

Поступила в редколлегию 01.11.2004.