

624.04
Ш 645

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Аспирант В.Н. Широков

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПЕСЧАНОГО ОСНОВАНИЯ ПОД КРУГЛЫМ ЖЕСТКИМ ФУНДАМЕНТОМ
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНО ДЕФОРМИРУЕМОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

Специальность 01.022 -
"Сопротивление материалов
и строительная механика"

05.23.17

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1971

ЧПИ

624.04 +539.3

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент В.И.Соломин.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Д.А.Гохфельд, кандидат технических наук, доцент Г.М.Сондюков.

Ведущее предприятие: НИИ оснований и подземных сооружений.

Публичная защита состоится на заседании Совета по присуждению ученых степеней инженерно-строительного факультета Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола "___" _____ 1971 года.

Автореферат разослан "___" _____ 1971 года.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: г.Челябинск-44, проспект имени В.И.Ленина, 76, ЧТИ, ученому секретарю Совета.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
доцент, кандидат технических наук

(Ю.В.Игнатьев)



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

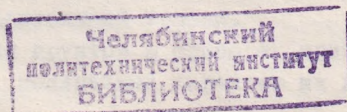
На правах рукописи

Аспирант В.Н. Широков

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПЕСЧАНОГО ОСНОВАНИЯ ПОД КРУГЛЫМ ЖЕСТКИМ ФУНДАМЕНТОМ
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНО ДЕФОРМИРУЕМОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

Специальность 01.022 -
"Сопротивление материалов
и строительная механика"

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Челябинск - 1971

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент В.И.Соломин.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Д.А.Гохфельд, кандидат технических наук, доцент Г.М.Сондюков.

Ведущее предприятие: НИИ оснований и подземных сооружений.

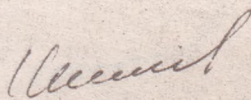
Публичная защита состоится на заседании Совета по присуждению ученых степеней инженерно-строительного факультета Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола " 3 " марта 1971 года.

Автореферат разослан "26" января 1971 года.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: г.Челябинск-44, проспект имени В.И.Ленина, 76, ЧПИ, ученому секретарю Совета.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
доцент, кандидат технических наук



(Ю. В.Игнатьев)

Настоящая работа посвящена совершенствованию существующих методов расчета оснований и фундаментных конструкций. Грунт рассматривается как упругая, нелинейно деформируемая сплошная весомая среда, законы деформирования которой принимаются из испытаний образцов в приборах трехосного сжатия.

Диссертация состоит из введения и четырех глав.

В О В В Е Д Е Н И И обосновывается постановка задачи и указываются цели исследований.

В настоящее время осадки фундаментов, а также усилия в них определяются на основе модели грунтового основания в виде линейно деформируемой сплошной среды.

Существующие нормативные документы ограничивают область применения линейной теории упругости (в зависимости от глубины возникновения зоны пластических деформаций под краем фундамента). Тем не менее, расчеты, основанные на принципе линейной деформируемости, часто дают значительно завышенные расчетные усилия в фундаментах при рабочих нагрузках. При этом величины общих и относительных осадок часто оказываются меньше предельно допустимых, т.е. несущая способность основания используется неполностью.

Установление предельной нагрузки на фундамент производится в предположении, что весь грунт (или часть его) находится в состоянии предельного равновесия.

Таким образом, существующие модели грунта позволяют рассматривать лишь отдельные фрагменты нагружения основания. Можно указать достаточно широкий диапазон нагрузок, когда линейные физические соотношения уже не применимы, но нагрузка еще далека от предельной. Для этого случая, весьма важного в практическом отношении, сейчас нет доведенной до приложений теории.

Испытания грунтов в приборах трехосного сжатия выявили сложный, нелинейный характер их деформирования. Учет

реальных свойств грунтов связан с необходимостью интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений. Замкнутые решения удалось получить лишь для немногих частных случаев с невесомой средой (В.В.Соколовский, К.Грубан, М.В.Малышев, Ю.К.Зарецкий). В то же время влияние собственного веса на напряженное состояние грунтов представляется весьма существенным (М.И.Горбунов-Посадов). Поэтому вполне оправданными являются попытки численного решения нелинейных задач с использованием ЭВМ.

Первые исследования нелинейных задач механики грунтов численным методом с применением ЭВМ принадлежат Е.Ф.Винокурову. Все основные уравнения, описывающие плоскую и пространственную задачи, представлены автором в конечно-разностной форме и для их решения используется метод упругих решений А.А.Ильюшина.

Э.Д.Фрадисом рассмотрена задача о действии нагрузки в условиях плоской деформации при нелинейных законах сдвиговой и объемной деформации.

В.А.Иоселевичем исследовано влияние различных законов деформирования на напряженное состояние массива со сферической полостью.

А.Л.Гольдиным рассмотрена плоская деформация нелинейно упругой грунтовой среды в предположении нелинейности как сдвиговой, так и объемной деформаций.

Анализ решений, учитывающих нелинейный характер связи между напряжениями и деформациями, показывает, что отказ от принципа линейной деформируемости позволяет получить результаты, более близкие к экспериментальным. Поэтому расширение круга задач, исследуемых в нелинейной постановке, представляется весьма целесообразным. Одна из таких задач рассматривается в данной работе.

Задача о действии незаглубленного круглого штампа на песчаное основание занимает особое место в механике грунтов. Несмотря на то, что незаглубленные фундаменты - явление весьма редкое, именно такая постановка задачи встре-

чается чаще всего в экспериментальных исследованиях, благодаря чему сложились определенные представления о характере взаимодействия незаглубленного фундамента с основанием.

Сложность законов деформирования грунтов, установленных путем стабиллометрических испытаний, делает актуальной проблему возможного упрощения уравнений, связывающих напряжения и деформации. С этой целью в данной работе исследуется влияние отдельных факторов, определяющих нелинейный характер сдвиговой деформации.

В первой главе сделан обзор результатов испытаний грунтов в приборах трехосного сжатия.

В §1.1 приводятся основные уравнения нелинейно упругой сплошной среды, из которых следует, что программа экспериментальных работ для построения модели грунта в виде нелинейно упругого тела должна включать в себя:

- 1) определение модуля сдвига и модуля объемной деформации в виде функции трех инвариантов тензора напряжения;
- 2) проверку применимости к грунтам постулата упругости и справедливости гипотезы о подобии напряженного и деформированного состояний.

В §1.2 приводятся результаты исследований сдвиговой деформируемости грунтов.

Опыты А.И.Боткина показали, что, в отличие от классических твердых тел, деформация сдвига песчаного образца зависит не только от касательных, но и от нормальных напряжений: $\epsilon_i = \epsilon_i(\sigma, \sigma_i)$. А.И.Боткин нашел, что эта зависимость может быть представлена в виде

$$G = \frac{\sigma_i}{\epsilon_i} = \frac{\lambda \sigma}{b + \epsilon_i}, \quad (1)$$

где σ_i - интенсивность касательных напряжений,

ϵ_i - интенсивность деформации сдвига,

λ, b - параметры, определяемые из опыта.

Из (1) легко установить, что параметр λ представляет предельное по прочности отношение ξ_i/ξ в условии прочности А.И.Боткина (при $\xi_i \rightarrow \infty$), а параметр δ равен ξ_i , когда $\xi_i/\xi = 0,5$, то-есть когда степень достижения предельного состояния равна 0,5.

Выражение (1) может быть обобщено на случай применения других критериев прочности:

$$\delta = \frac{\xi_i}{\xi} = \frac{\xi_i}{\delta} \left(\frac{P_0}{P} - 1 \right), \quad (2)$$

где P - критерий, характеризующий степень достижения предельного состояния согласно принятой теории прочности;

P_0 - предельное значение этого критерия (обозначения, введенные Г.М.Ломизе).

Изучению сдвиговой деформации грунта посвящены работы М.В.Мальшева, А.С.Строганова, И.В.Федорова, С.С.Вялова, Г.М.Ломизе, Е.И.Медкова, Б.Н.Баршевского, А.Л.Крыжановского, И.Н.Иващенко, Магер Исаака, Э.Д.Фрадиса, Э.И.Воронцова и ряда других, отечественных и зарубежных исследователей.

В работах Г.М.Ломизе и А.Л.Крыжановского впервые грунт исследовался в условиях сложного напряженного состояния с независимым управлением тремя главными напряжениями. Опыты показали, что сдвиговая деформация в грунтах зависит от всех трех инвариантов тензора напряжения, то-есть

$$\xi_i = \xi_i(\sigma, \sigma_i, \mu_\sigma);$$

где μ_σ - параметр Лоде для напряжений.

Влияние вида напряженного состояния на деформацию сдвига подтверждено также в опытах Э.Д.Фрадиса и Э.И.Воронцова.

В §1.3 приводятся результаты исследований объемной деформации в грунтах.

А.И.Боткин, предлагая нелинейный закон сдвиговой деформации, считал возможным для объемной деформации применение линейного закона. Позднее разными исследователями были проведены опыты, позволившие установить сложный характер объемной деформации в грунтах (Б.Н.Баршевский,

А.С.Строганов, С.С.Вялов, Д.Тейлор, М.Н.Гольдштейн, М.В. Малышев, Г.М.Ломизе, И.Н.Иващенко, Ю.К.Зарецкий, Э.Д.Фрадис и др.).

В §1.4 приведены результаты изучения влияния траектории нагружения и проверки подобия напряженного и деформированного состояний. Результаты опытов Г.М.Ломизе, И.Н.Иващенко, А.Л.Крыжановского, Магер Исаака и других исследователей показывают, что вид траектории нагружения оказывает заметное влияние на деформацию глинистых грунтов, тогда как в песчаных грунтах это влияние незначительно.

Исследованиями А.Л.Крыжановского, Э.Д.Фрадиса и Э.И.Воронцова установлено, что тензоры напряжения и деформации можно считать подобными.

В §1.5 сделаны выводы по 1 главе и конкретизирована цель исследования.

Анализ испытаний грунтов позволяет заключить, что нелинейность сдвиговой деформации является наиболее характерной их особенностью, в то время как закон изменения объема в первом приближении может быть принят линейным. Такое предположение впервые было выдвинуто А.И.Боткиным и подтверждено в опытах Э.Д.Фрадиса. Закон сдвиговой деформации принят нами в форме (1), предложенной А.И.Боткиным.

Главное достоинство этой зависимости состоит в том, что она сохраняет силу во всем диапазоне нагружения основания вплоть до состояния предельного равновесия. В самом деле, если ξ стремится к бесконечности, то, как это следует из зависимости (1), модуль сдвига стремится к нулю. А это означает, что уравнения, связывающие напряжения и деформации, пригодны и для описания состояний, сколь угодно близких к предельным. Весьма важно в практическом отношении и то обстоятельство, что для определения параметров, входящих в эту зависимость, достаточно обычных стабилметрических испытаний.

Приведенные соображения позволяют конкретизировать цель исследования:

а) на основе решения задачи о действии незаглубленного круглого жесткого штампа на песчаное основание, свойства которого описываются нелинейным законом сдвиговой деформации в форме (1) и линейным законом объемной деформации, установить, в какой степени учет нелинейности сдвиговой деформации приближает результаты теоретического решения к тем данным, которые получены путем экспериментов со штампами;

б) на основе решения этой же задачи при некоторых предположениях о характере сдвиговой деформации получить представление о влиянии отдельных факторов, определяющих деформацию сдвига в грунтах (влияние σ , σ_1 , μ_c).

Вторая глава посвящена разработке численного метода расчета грунтового основания под круглым жестким фундаментом при произвольном законе упругого деформирования основания.

В §2.1. уравнения, описывающие поставленную задачу (в цилиндрических координатах), сведены к системе двух нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка относительно компонент перемещения w и u .

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} (2G + \lambda) + \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} G + \frac{\partial w}{\partial z} \left(2 \frac{\partial G}{\partial z} + \frac{\partial \lambda}{\partial z} \right) + \frac{\partial w}{\partial r} \left(\frac{G}{r} + \frac{\partial G}{\partial r} \right) + \\ & + \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial r} (G + \lambda) + \frac{\partial u}{\partial z} \left(\frac{\partial G}{\partial r} + \frac{G}{r} + \frac{\lambda}{r} \right) + \frac{\partial u}{\partial r} \frac{\partial \lambda}{\partial z} + \frac{u}{r} \frac{\partial \lambda}{\partial z} + \gamma = 0, \\ & \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} (2G + \lambda) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} G + \frac{\partial u}{\partial r} \left(2 \frac{\partial G}{\partial r} + \frac{\lambda}{r} + 2 \frac{\partial G}{\partial r} + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \right) + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial G}{\partial z} + \\ & + u \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \lambda}{\partial r} - \frac{1}{r^2} - 2 \frac{G}{r^2} \right) + \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial z} (G + \lambda) + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial \lambda}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial r} \frac{\partial G}{\partial z} = 0, \\ & G = G \left(\frac{\partial w}{\partial z}, \frac{\partial w}{\partial r}, \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial r}, r \right), \\ & \lambda = \lambda \left(\frac{\partial w}{\partial z}, \frac{\partial w}{\partial r}, \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial r}, r \right) \end{aligned}$$

При этом использованы линейные геометрические соотношения.

Граничные условия на контакте штампа с основанием при-

няты в таком виде:

$$w = w_0 = \text{const}, \quad u = 0,$$

то-есть соответствуют полному прилипанию штампа к основанию. Собственный вес грунта включен в уравнения равновесия.

§2.2 посвящен выбору способа решения нелинейных дифференциальных уравнений. На основе анализа существующих методов решения нелинейных задач предпочтение было отдано методу конечных разностей в сочетании с методом переменных параметров упругости.

В §2.3 дифференциальные уравнения записаны в конечно-разностной форме. Установлено, что для решения нелинейной задачи о штампе на полупространстве можно ограничиться сеточной областью размером $H = 8R$, $T = 16R$, где R - радиус штампа, H и T - высота и радиус рассматриваемого цилиндра. При этом были использованы решения К.Е.Егорова, С.С.Давидова и результаты пробных расчетов. Граничные условия на внутреннем контуре сеточной области следующие (начало координат совмещено с центром контактной поверхности):

$$z = H: w = 0, u = 0; \quad z = T: \partial w / \partial z = 0, u = 0 \quad (3)$$

Последнее условие в (3) соответствует условиям работы грунта при $z \rightarrow \infty$.

В §2.4 описан способ последовательного сгущения сетки. Показано, что использование регулярной сетки во всей рассматриваемой области приводит к практически неразрешимым вычислительным трудностям: если, например, шаг сетки принять равным $R/8,5$ (исследования показали, что в этом случае решение имеет удовлетворительную точность), то порядок системы разностных уравнений будет равен 18 906.

В данной работе на первом этапе решается задача в области $H \times T = 8R \times 16R$ с шагом $h = R/8,5$. Число уравнений при этом равно 1722. Затем рассматривается часть этой области, размером $H \times T = 1,76R \times 2,47R$. Шаг сетки равен здесь $h' = R/8,5$, порядок системы 704. Размеры сгущаемой области обоснованы пробными расчетами.

§2.5 посвящен выбору способа решения систем разностных уравнений высокого порядка с учетом особенностей ЭВМ. Предпочтение отдано одношаговому циклическому процессу. Опыт программирования и вычислений показал, что этот способ наиболее естественно сочетается с методом переменных параметров упругости (принятым для линеаризации дифференциальных уравнений) и при его использовании можно обойтись без запоминания промежуточных результатов и внешней памяти машины.

В §2.6 дается краткое описание программы (для ЭВМ "Минск-22") решения задачи о вдавливании круглого штампа в полупространство при любом заданном законе упругого деформирования. Программа занимает 768 ячеек оперативной памяти машины. Внешние запоминающие устройства не используются. Среднее время решения нелинейной задачи о штампе на полупространстве ($N/R = 8$) составляет 1,5 часа, в том числе:

- а) решение при крупной сетке ($k = R/2, 5$) - 50-60 минут;
- б) интерполирование w , u , G и λ для узлов мелкой сетки ($k = R/8, 5$) - 1 минута.
- в) решение при мелкой сетке - 30 минут.

В процессе работы машина печатает значения вертикальных перемещений на оси штампа, реактивных давлений и среднего давления по подошве штампа. Эти значения используются при определении сходимости итерационного процесса.

Исходные данные для решения задачи:

- 1) радиус штампа,
- 2) объемный вес грунта,
- 3) число шагов сетки m и n вдоль осей x и z ,
- 4) число загруженных узлов,
- 5) перемещение штампа w_0 .

По достижении требуемой точности расчетов машина

выдает на печать следующие данные (в каждом узле сетки): компоненты перемещения w, u ; деформации $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xz}$, напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xz}$, среднее давление σ , интенсивность деформаций сдвига ϵ_i , характеристику вида напряженного состояния $\cos 3\varphi$, модуль сдвига G , модуль объемного сжатия K , а также среднее давление по подошве штампа q .

Число рассматриваемых узлов сеточной области на каждом этапе должно удовлетворять условию

$$(n+2)(n+2) \leq 1792$$

Это требование вытекает из возможностей подпрограммы решения разностных уравнений, которая позволяет рассматривать системы до 3584 порядка.

В программе предусмотрена возможность решения задачи при различных законах как сдвиговой, так и объемной деформации путем введения (или замены) подпрограмм вычисления модуля сдвига G и модуля объемной деформации K . Для этой цели в программе имеется 250 свободных ячеек памяти.

В §2.7. дано сравнение с другими решениями. Поскольку нелинейные решения аналогичной задачи отсутствуют, были рассмотрены линейные задачи:

а) круглый жесткий штамп на упругом слое (решение К.Е. Егорова и Р.В. Серебряного),

б) гибкая равномерно распределенная по площади круга нагрузка на упругом слое. Решение этой задачи в аналитической форме получено К.Е. Егоровым. Вычисление осадок слоя выполнено по ранее разработанной программе (В.И. Соломин, В.Н. Широков, Б.А. Комаров).

Сравнение показало достаточно высокую точность результатов, полученных с помощью настоящей программы.

В §2.8. исследовано влияние способа учета собственного веса грунта. На основе сравнения решений, в одном из которых собственный вес грунта учитывается в уравнениях равновесия, а в другом — накладывается по гидростатичес-

кому закону, установлено значительное различие в результатах расчетов и поэтому в дальнейших исследованиях собственный вес включен в уравнения равновесия. Кроме того, было признано целесообразным несколько изменить классическую схему метода упругих решений: в качестве начального приближения удобнее принимать решение нелинейной задачи о действии собственного веса грунта. В этом случае значительно сокращается время вычислений и повышается точность.

Третья глава посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния песчаного основания под незаглубленным круглым жестким фундаментом диаметром $D = 15$ м. Характеристики грунта (по данным Э.Д. Фрадиса):
удельный вес $2,65 \text{ г/см}^3$,
объемный вес $1,66 \text{ г/см}^3$,
коэффициент пористости $0,60$,
угол внутреннего трения $38^\circ 10'$,
параметры нелинейной зависимости сдвиговой деформации (1)
 $n = 0,96$; $B = 0,75 \cdot 10^{-2}$ (рис. 1а),
модуль объемного сжатия - 300 кг/см^2 .

В §3.1 приведена зависимость между осадкой штампа и нагрузкой q (равной среднему давлению по подошве фундамента). Из рис.2 (кривая "а") видно, что учет нелинейности сдвиговой деформации позволяет получить зависимость $q \sim w$, качественно соответствующую тем представлениям, которые сложились на основе экспериментальных исследований.

В §3.2 приводится распределение нормальных и касательных напряжений, действующих по контакту штампа с основанием.

На рис. 3 показаны полученные в нелинейном расчете опоры относительных реактивных давлений (p/q) при нагрузках $0,33$; $1,13$; $2,50 \text{ кг/см}^2$ (пунктирная линия соответствует линейному решению).

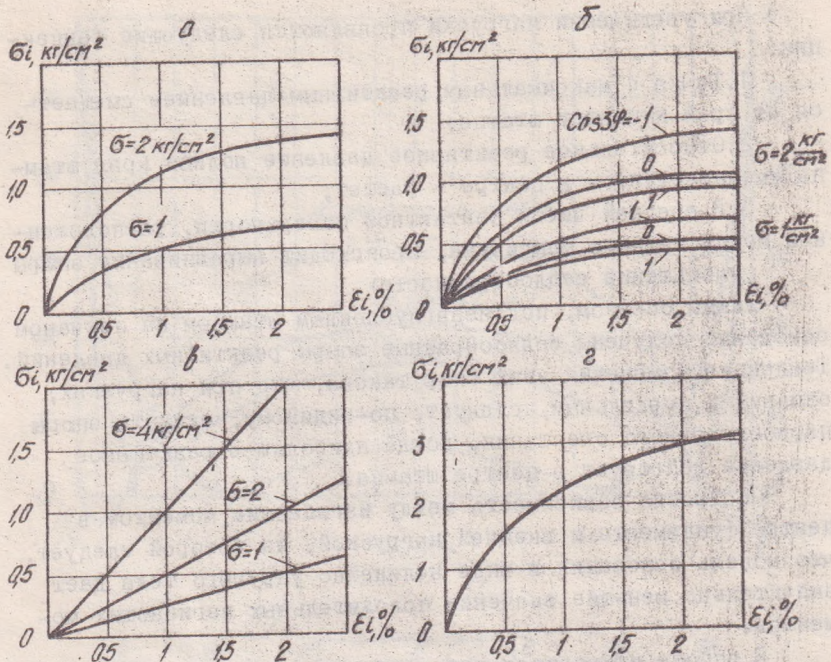


Рис. 1

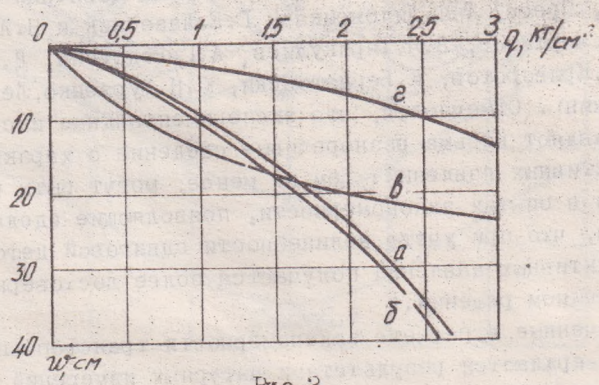


Рис. 2

При увеличении нагрузки проявляются следующие тенденции:

1. Точка с максимальным реактивным давлением смещается от края к центру штампа;
2. Относительное реактивное давление вблизи края штампа уменьшается, а в центре - растет;
3. В средней части контактной поверхности, расположенной между точками максимума, происходит выравнивание эпюры (уменьшение седлообразности).

Таким образом, под незаглубленным штампом на песчаном основании получены седлообразные эпюры реактивных давлений. Тенденция изменения этих эпюр такова, что при нагрузках, близких к предельным, следует, по-видимому, ожидать эпюры параболического очертания, когда наибольшее реактивное давление действует в центре штампа.

Построена зависимость между изгибающим моментом в центре фундамента и внешней нагрузкой, из которой следует, что модель основания в виде нелинейно упругого тела дает значительно меньшие значения положительных изгибающих моментов.

В работе приводится анализ результатов многочисленных экспериментальных исследований реактивных давлений (Кеглер и Шейдиг, Пресс, Т.Ф. Липовецкая, Г.Е. Лазебник и Н.А. Смирнов, А.Т. Мартишос, З.Я. Тарикудиев, А.Г. Родштейн, Д.С. Баранов, А.П. Криворотов, К. Бернатовски, Ю.Н. Мурзенко, Ле-Ат-Хой, Г.А. Скормин). Отмечается, что экспериментальные исследования поставляют весьма разноречивые сведения о характере эпюр реактивных давлений. Тем не менее, могут быть выделены общие в опытах закономерности, позволяющие сделать вывод о том, что при учете нелинейности сдвиговой деформации эпюры реактивных давлений получаются более достоверными, чем в линейном решении.

Полученные в расчете закономерности трансформации эпюр подтверждаются результатами натуральных измерений реактивных давлений под фундаментом диаметром $\approx 1,6$ м (Г.Е. Лазебник).

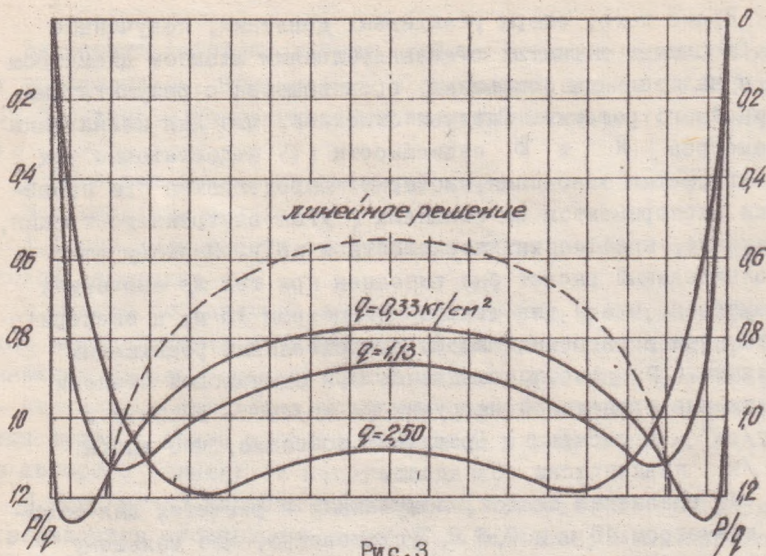


Рис. 3

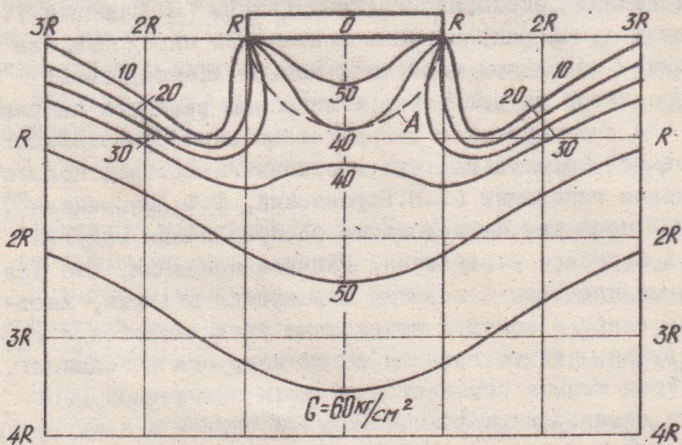


Рис. 4

0400159

Кроме того, эпюры реактивных давлений, полученные Г.А.Скорминым в опытах с незаглубленным штампом диаметром 0,6 м на песчаном основании, сравниваются с результатами нелинейного решения. Следует отметить, что для назначения параметров λ и ν зависимости (1) недостаточно тех характеристик основания, которые определяются при проведении экспериментов со штампами (угол внутреннего трения, сцепление, коэффициент пористости и др.). Поэтому этот дополнительный расчет был выполнен при тех же значениях параметров, что и для штампа диаметром 15 м, а экспериментальные и расчетные эпюры относительных реактивных давлений (p/q) сопоставлялись при одинаковой степени достижения предельной нагрузки ($\approx \text{кг/см}^2$ - в опыте и 1 кг/см^2 - в расчете). Сравнение показало, что эпюры p/q практически совпадают.

Из сравнения осадок, полученных в расчетах для штампов диаметром 15 м и 0,6 м, установлено, что большему штампу соответствует меньшая относительная осадка w/δ (при одинаковом среднем давлении на грунт), что отвечает многочисленным экспериментальным данным (Н.А.Цытович).

Касательные напряжения в контактной плоскости, за исключением небольшой области в центре штампа, имеют противоположное по сравнению с линейным решением направление, что согласуется с результатами экспериментальных исследований касательных сил в основании жесткой полосы на песчаном основании (Б.Н.Баршевский, Т.Ф.Липовецкая).

§3.3 посвящен исследованию распределения модулей сдвига в процессе нагружения. Расчеты показали, что под штампом на песчаном основании образуется область, жесткость на сдвиг в которой непрерывно увеличивается с ростом нагрузки, причем границы её от нагрузки не зависят. Вблизи края штампа образуется область пониженной жесткости на сдвиг. Линии равных модулей сдвига для нагрузки $2,50 \text{ кг/см}^2$ показаны на рис.4. Линия "А" определяет границу области упрочнения.

Изменение деформированных свойств основания соответствует предпосылкам, принимаемым в смешанной задаче (М.И. Горбунов-Посадов) и подтверждается экспериментально (Г.А. Скормин).

В §3.4 дан анализ перемещений песчаного основания.

Исследования показали:

1. Форма поверхности основания зависит от величины приложенной нагрузки;

2. Вместо бесконечной осадочной воронки, которая образуется вокруг штампа на линейно-деформируемом основании, нелинейная модель основания дает воронку конечных размеров: лишь незначительная часть основания вокруг штампа перемещается вниз, а далее происходит подъем в виде валика, размеры которого зависят от нагрузки;

3. Полученная картина перемещения поверхности основания подтверждается экспериментально (И.И. Черкасов, М.И. Манвелов, Ле-Ат-Хой, Г.А. Скормин).

4. Вертикальные перемещения с глубиной затухают значительно быстрее, чем в линейной среде: сжатие слоя мощностью 3-4 радиуса штампа на 95% определяет его осадку. Этот результат подтверждается многочисленными исследованиями (Х.Р. Хахимов, К.Е. Егоров, А.П. Коновалов, А.П. Почаевец, В.Е. Швец, Г.Е. Кульчицкий и др.).

§3.5 посвящен исследованию напряженного состояния основания.

1. Полученное в расчете более концентрированное распределение вертикальных напряжений по глубине в той части основания, которая расположена под штампом, отмечалось многими экспериментаторами (Кеглер и Шейдиг, И.В. Федоров, В.Ф. Габков, Д.С. Гаранов, Г.Е. Лазебник, Ле-Ат-Хой, К. Бернатовски, Г.А. Скормин, Г.М. Кованев и др.).

2. Характер распределения горизонтальных напряжений в нелинейной среде отличается от линейного решения и под-

тверждается экспериментальными данными Г.А.Скормина.

В §3.6 исследовано распределение всестороннего сжатия σ и интенсивности деформации сдвига ε_i .

Если значения σ и ε_i считать аргументами, определяющими величину модуля сдвига, то образование зоны пониженной жесткости на сдвиг вблизи края штампа следует связать с уменьшением всестороннего сжатия в этой зоне, а уменьшение модуля сдвига под краем штампа и на оси при $z = R$ - с развитием ε_i .

На основе рассмотрения изменения σ и σ_i показано, что (за исключением небольшой области вблизи поверхности за пределами штампа) траектории нагружения лежат между линиями $\sigma = \text{const}$ ($d\sigma_i > 0$) и траекторией компрессионного сжатия.

Как показывают приведенные в 1 главе исследования, при нагружении по таким траекториям песок практически не проявляет своих неупругих свойств. Следовательно, использование законов упругого деформирования в данной задаче является оправданным.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния факторов, определяющих сдвиговую деформируемость грунтов.

С целью такого исследования были выполнены расчеты со следующими зависимостями для модуля сдвига

$$G = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} = \frac{A\sigma}{B + \varepsilon_i} \frac{1}{1 + m(1 + \cos 3\psi)^n}, \quad (4)$$

$$G = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} = c\sigma, \quad (5)$$

$$G = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} = \frac{\sigma_0}{B + \varepsilon_i}, \quad (6)$$

где A, B, m, n, c, σ_0 - параметры,
 ψ - угол вида напряженного состояния.

Выражение в форме (4) предложено Э.Д.Фрадисом. Для песка средней плотности им было получено: $\lambda = 0,96$,
 $\beta = 0,75 \cdot 10^{-2}$, $m = 0,34$, $n = 0,48$.

Выражение (1), использованное в III главе, получается из (4) как частный случай, если положить $\cos 3\psi = -1$, т.е. пренебречь влиянием вида напряженного состояния и из всего семейства кривых (рис. 1б), определяемых выражением (4), в расчетах использовать лишь те, которые получаются в обычных стабилметрических испытаниях (когда $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$).

Выражение (5) отражает влияние внутреннего трения на величину модуля сдвига и независимость его от деформации. Оно носит несколько искусственный характер, так как не дает выполаживания зависимостей $\sigma_1 - \varepsilon_1$ (рис. 1в) и представляет скорее теоретический интерес.

Выражение (6) характерно для связанных грунтов, сопротивление сдвигу которых практически не зависит от σ (глины с малым углом внутреннего трения). В отличие от рассмотренных, эта зависимость изображается одной инвариантной кривой (рис. 1г).

В расчетах принято: $c = 25$, $\sigma_0 = 4 \text{ кг/см}^2$. Модуль объемного сжатия по-прежнему равен 300 кг/см^2 .

Поскольку выражение

$$G = \frac{\lambda \sigma}{\beta + \varepsilon_1}$$

может быть представлено в виде

$$G = \frac{1}{\beta} (\lambda \sigma - \sigma_1), \text{ а } \cos 3\psi = \frac{\mu \sigma (9 - \mu^2)}{(3 + \mu^2)^{3/2}},$$

то на основании сравнения расчетов, выполненных с использованием формул (4)-(6) и (1), можно судить о влиянии зависимости сдвиговой деформируемости от σ , σ_1 и $\mu \sigma$, т.е. от всех трех инвариантов напряженного состояния.

При сравнении решений в качестве основных критериев использовались зависимости $q \sim w$ и эпюры реактивных давлений.

Расчеты показали, что в задаче о незаглубленном круглом штампе можно пренебречь влиянием вида напряженного состояния: разница в осадках не превышает 10% (кривые "а" и "б" на рис.1), а эпюры реактивных давлений довольно близки по форме.

Расчеты с использованием выражения (5) приводят к недостоверным результатам; зависимость осадки от нагрузки (рис. 1в) имеет кривизну, обратную наблюдаемой в опытах, а эпюры реактивных давлений имеют пики под краями штампа, причем, с ростом нагрузки величина давлений под краями штампа интенсивно растет.

При использовании зависимости (6) график $q \sim W$ (рис. 1г) имеет характер, аналогичный полученному в расчетах с использованием зависимостей (1) и (4), но эпюры реактивных давлений имеют значительную седлообразность, не наблюдаемую в опытах с незаглубленными штампами на песчаном основании. С ростом нагрузки давление под штампом несколько выравнивается.

ВЫВОДЫ:

1. Разработан метод определения перемещений и напряжений в грунтовом основании под круглыми жесткими фундаментами с учетом некоторых специфических свойств грунтов:

1. Грунт рассматривается как упругая, нелинейно деформируемая сплошная весомая среда, законы деформирования которой принимаются из испытаний образцов в приборах трехосного сжатия. В число аргументов, определяющих модуль сдвига и модуль объемной деформации, в самом общем случае могут входить все три инварианта тензора напряжения.

2. Для решения нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих поведение рассматриваемой модели грунта, используются:

а) Метод переменных параметров упругости (линеаризация исходных уравнений);

б) Метод конечных разностей (сведение дифференциальных уравнений к системе алгебраических);

в) Схема одношагового циклического процесса (решение систем разностных уравнений высокого порядка);

г) Метод последовательного сгущения сетки (уточнение решения).

3. Для ЭВМ "Минск-22" разработана программа решения задачи о круглом штампе на везомом, нелинейно деформируемом грунтовом основании с любыми заданными законами деформирования основания. Все этапы расчета, включая формирование матрицы уравнений, выполняются машиной. Для решения разностных уравнений составлена подпрограмма, позволяющая на каждом этапе последовательного сгущения сетки рассматривать системы до 3584 порядка с использованием только оперативной памяти машины. Среднее время решения нелинейной задачи о штампе на полупространстве составляет 1,5 часа.

II. На основе сравнения решений, в одном из которых собственный вес был включен в уравнения равновесия, а в другом - вызванное собственным весом напряженное состояние принималось по гидростатическому закону и накладывалось на напряжения от внешней нагрузки, установлено:

1. Способ учета собственного веса грунта существенным образом влияет на результаты расчета и поэтому нелинейные задачи механики грунтов следует решать с включением собственного веса в уравнения равновесия.

2. Для ускорения вычислительного процесса решения двумерных и трехмерных задач механики грунтов следует принимать начальное приближение из решения одномерной нелинейной задачи о действии собственного веса грунта.

III. На основе анализа стабиллометрических исследований установлено, что в первом приближении законы деформирования грунтов могут быть приняты в форме, предложенной А.И. Боткинчым: объемная деформация - линейно зависящей

от всестороннего сжатия, а сдвиговая - в виде нелинейной функции интенсивности касательных напряжений и всестороннего сжатия.

1У. Путем решения ряда задач о вдавливании круглого незаглубленного штампа в грунтовое основание при различных предположениях относительно закона сдвиговой деформации исследовано влияние параметров, определяющих деформацию сдвига.

В результате установлено:

1. Выражение для сдвиговой деформации в песчаных грунтах может включать в себя лишь два аргумента: первый инвариант тензора и второй инвариант девiatorа напряжения (или деформации). В задаче о круглом незаглубленном штампе на песчаном основании влияние зависимости сдвиговой деформации от третьего инварианта тензора напряжения несущественно.

2. Для сыпучих грунтов удовлетворительные результаты могут быть получены в предположении $\epsilon_1 = \epsilon_1(\sigma_1)$, т.е. без учета влияния всестороннего сжатия. Деформационная зависимость $\epsilon_1 = \epsilon_1/\sigma_1(\sigma_1)$, не учитывающая влияние интенсивности касательных напряжений на величину модуля сдвига, приводит к результатам, противоречащим опытным.

У. Исследовано напряженно-деформированное состояние песчаного основания под незаглубленным круглым жестким штампом диаметром 15м. Путем сравнения теоретического решения с результатами натурных и лабораторных исследований установлено, что модель грунтового основания в виде нелинейно деформируемой сплошной среды позволяет получить результаты, качественно совпадающие с экспериментальными. Расчетами установлено:

1. Зависимость между нагрузкой и осадкой штампа нелинейна, причем, податливость основания с ростом нагрузки увеличивается.

2. Под незаглубленным штампом на песчаном основании получены седлообразные эпюры реактивных давлений с нулевыми ординатами под краями. Трансформация эпюр при нагружении такова, что при нагрузках, близких к предельным, следует ожидать эпюры параболического очертания.

Полученные в нелинейном решении эпюры дают значительное снижение положительных изгибающих моментов в фундаменте по сравнению с линейным решением.

3. Касательные напряжения в контактной плоскости, за исключением небольшой области в центре штампа, имеют противоположное по сравнению с линейным решением направление.

4. Распределение модулей сдвига в основании штампа соответствует предположкам, принимаемым в смешанной задаче. Подтверждено наличие области вблизи края штампа, в которой модуль сдвига стремится к нулю. Показано также, что под штампом на песчаном основании образуется область, жесткость на сдвиг в которой увеличивается с ростом нагрузки, причем, границы её от нагрузки не зависят. По-видимому, в пределах этой области и образуется "упругое" ядро, наблюдаемое в экспериментах.

5. Распределение вертикальных деформаций в нелинейном основании позволяет сделать вывод о том, что глубина деформируемой зоны грунта практически не превышает 3^x-4^x радиусов штампа, что связано не только с возрастанием модуля сдвига по глубине, но и с наличием области пониженной жесткости на сдвиг вблизи края штампа.

6. Нулевая осадка поверхности основания имеет место в непосредственной близости от штампа.

7. Вертикальные и горизонтальные напряжения под штампом в нелинейной среде с глубиной затухают медленнее, чем в линейно деформируемом полупространстве.

У1. Сравнение осадок, полученных в расчетах для штампов диаметром 15 м и 0,6 м, показало, что большему диамет-

ру штампа соответствует меньшая относительная осадка w/δ (при одинаковом среднем давлении на грунт), что согласуется с многочисленными экспериментальными данными. Следовательно, рассмотренная модель грунтового основания может быть использована для пересчета характеристик деформируемости, полученных в испытаниях малыми штампами, при проектировании фундаментов больших размеров.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. ШИРОКОВ В.Н., СОЛОМИН В.И., МАЛЫШЕВ М.В., ЗАРЕЦКИЙ Ю.К. Напряженное состояние и перемещение вессомого нелинейно деформируемого грунтового полупространства под круглым жестким штампом. "Основания, фундаменты и механика грунтов", № 1, 1970г.

2. ШИРОКОВ В.Н. Теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния сыпучей среды, нагруженной посредством круглого штампа. Труды пятой научно-технической конференции молодых научных сотрудников, (9-10 июня), "Основания, фундаменты и подвешенные сооружения", М., 1970г.

3. ШИРОКОВ В.Н. К задаче о круглом жестком штампе на нелинейно деформируемом грунтовом полупространстве (влияние зависимости сдвиговой деформируемости от вида напряженного состояния). "Основания, фундаменты и механика грунтов", (принято в печать).

Отдельные разделы диссертации были доложены и обсуждены:

1. На пятой научно-технической конференции молодых научных сотрудников, НИИОСП, 9-10 июня 1969г.

2. На ежегодных научно-технических конференциях Челябинского политехнического института в 1967-1970гг.

Тел. редактор Пашерина Т.А.

№ 2024-19/1-71г. Сдано в печать 20/1-71г. Формат 60x90/16. Объем
1,5 п.л. Отпечатано на ротационной ЧП. Тираж 120 экз. Заказ № 17