

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

А.М.ГЕЛЬФАНДБЕИН

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ ЦЕПНЫЕ МОДЕЛИ
ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ
С ДВУМЯ НЕЗАВИСИМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
(Специальность № 481. Основания, фундаменты
и подземные сооружения)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г.Днепропетровск
1968 г.

НТБ
ДНУЖТ

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

А.И. ГЕЛЬБАНДБЕЛН

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ ЦЕПНЫЕ МОДЕЛИ
ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ
С ДВУМЯ НЕЗАВИСИМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
(Специальность № 481. Основания, фундаменты
и подземные сооружения)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Л.П. ГОЛДЫТЕЛН

г. Днепропетровск
1968 г.

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в лаборатории фундаментов промышленных сооружений научно-исследовательского и проектного института Харьковский Промстройинишпроект.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор М.Н.ГОЛЬДШТЕЙН

О ф и ц и а л ь н ы е о п п о н е н т ы:

Доктор технических наук, профессор Н.А. СИМБУЛИДИ

Кандидат технических наук Н.Я.РУДНИЦКИЙ

Ведущее предприятие: проектный институт ДНТИПРОНАХТ

Автореферат разослан " 22 " ноября 1968 г.

Защита диссертации состоится " 24 " декабря 1968 г.
на заседании Ученого Совета Днепропетровского института
инженеров железнодорожного транспорта.

Отзывы на автореферат в двух экз., заверенных
печатью учреждения, просим направлять по адресу:
г.Днепропетровск, 10, ул. Университетская 2, Днепропетровский
институт инженеров железнодорожного транспорта, Ученому
секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
института.

Ученый секретарь Совета, доцент

В.А.РАДЗИКОВСКИЙ

НТБ
ДНУЖТ

Проблема расчета конструкций на упругом и, в частности, грунтовом основании имеет большое научное и практическое значение. Ее актуальность вызывается требованиями развивающегося строительства, разнообразием и сложностью зданий, сооружений и оснований, необходимостью дальнейшего совершенствования существующих методов расчета, с целью их лучшего приближения к действительности.

Настоящее исследование посвящено разработке моделей грунтового основания как функциональных систем дискретных связей с независимыми параметрами жесткости, составлению зависимостей для расчета численными методами осадок основания, имитируемого такими моделями, и решениям некоторых контактных задач.

Во введении кратко излагается общее состояние вопроса. Важный вклад в развитие теории и практических методов расчета конструкций на упругом основании внесли работы Н.П.Пузыревского, Г.Э.Проктора, А.Н.Крылова, А.Н.Дынина, Н.М.Герсегованова, В.А.Флорина, М.И.Горбунова-Посадова, Б.Г.Коренева, К.Е.Егорова, М.М.Филоненко-Бородича, В.Э.Власова, П.Л.Пастернака, В.И.Кузнецова, И.А.Симвулиди, И.И.Черкасова, Г.К.Клейна, И.И.Кандаурова, Л.П.Винокурова, А.П.Синицына, И.Я.Штаермана, О.Я.Шехтер и др.

Исследования в области механики грунтов, инженерного грунтоведения и фундаментостроения Н.М.Герсегованова, В.А.Флорина, Н.А. Цитовича, Н.Я.Денисова, М.Н.Гольдштейна, В.В.Соколовского, Н.В.Ориятского, Г.М.Ломизе, Н.Н.Маслова, Д.Е.Польшина, Р.А.Токаря, В.Г.Булмачева, С.А.Роза, Е.И.Медкова, В.Г.Березанцева, В.П.Аваньева, Д.М.Абелева, Б.И.Дахматова, Н.А.Лалетина, А.М.Драникова, В.В.Михеева, М.В.Малышева, В.Н.Голубкова, М.Г.Ефремова, Е.Ф.Вино-

НТБ
ДНУЖТ

курова, П.Д.Евдокимова, В.А.Зурнадзи, В.Б.Швеца, Х.Р.Хакимова и др. обусловили успешное развитие теории фундаментостроения и широкое внедрение практических методов расчета конструкций на грунтовом основании.

Перечисленные исследования являются фундаментальной основой решения разнообразных задач инженерной практики, работ по дальнейшему совершенствованию расчетных моделей оснований и методов расчета и повышению достоверности характеристик грунтов.

Первая глава посвящена обзору и анализу широко применяющихся и др. известных моделей основания. Их особенности рассматриваются во взаимосвязи с соответствующими механическими характеристиками грунтового основания, применительно к задаче расчета его осадок и определения контактных давлений.

В отношении модели Винклера в частности отмечается, что на величину коэффициента постели, определяемого с помощью штамповых испытаний, оказывает влияние не только непосредственно нагруженный участок основания, но и примыкающая к нему ненагруженная область; с ростом площади фундамента влияние последней, как известно, изменяется. Однако, участие ненагруженной области основания в формировании осадок фундамента (штампа), не отражаемое моделью, приписывается единственной характеристике – сопротивлению основания сдвигу, что является одним из источников расхождений между расчетом по модели Винклера и действительностью.

Уподобление грунта среде теории упругости (линейно деформируемой среде) приводит в этом смысле к обратному результату: учитывается распределяющая способность теоретической сплошной среды, значительно более высокая, чем реальной грунтовой. Следовательно, влияние примыкающей к фундаменту (штампу) ненагружен-

ной области сильно преувеличивается. Следствием этого является значительная концентрация расчетных реактивных отпоров основания в некоторой зоне у краев фундамента и уменьшение их в средней зоне. Такое перераспределение интенсивностей отпоров ведет в некоторых случаях к преувеличению изгибающих моментов и поперечных сил в фундаментных конструкциях, обладающих относительно высокой жесткостью.

Линейно деформируемая среда отличается, практически, постоянством отношения ее сопротивления сжатию к сопротивлению сдвигу (небольшие колебания значений коэффициента поперечной деформации грунтов мало влияют на это отношение). Сопротивляемость грунтов сдвигу в значительной мере определяется, как показывают многочисленные исследования, объемным напряженным состоянием.

Вследствие упомянутых выше различий этих обеих сред зависимости теории линейно деформируемой среды не всегда отражают действительный эффект распределяющей способности различных грунтов. Указанные расхождения в значительной мере смягчаются при использовании модели упругого слоя конечной толщины, или если грунтовая среда рассматривается как упруго-пластическое тело.

Несмотря на известные недостатки, модели коэффициента постоли и линейно-деформируемой среды нашли широкое применение, оправданное многолетней практикой.

Двухпараметровая модель П.Л.Пастернака при всех ее существенных недостатках, отчетливо проявляющихся в предложенном им методе расчета, обладает одной важной особенностью: она дает возможность оба основных параметра сопротивления основания - сжатия и сдвигу - учитывать как независимые. Так как численные значения этих параметров определяются по результатам полевых испи-

таний грунтового основания штампом, модель Ц.Д.Пастернака позволяет ближе к действительности описать характер деформирования грунтового основания.

Исследования последнего времени характеризуются тенденцией к более полному учету специфических особенностей деформирования реального грунтового основания. В этой связи большое научное и практическое значение имеют модели основания со смешанными свойствами (комбинированные модели) И.И.Черкасова- Г.К.Клейна, А.П.Синицына, И.Я.Штаермана и др. Эти модели позволяют учитывать эффект проявления местных (необратимых) деформаций грунтового основания, интенсивно развивавшихся главным образом в некоторой зоне под фундаментом, и упругих, распространявшихся во всей области деформирования, и таким образом существенно приблизиться к учету фактических условий совместной работы фундаментной конструкции и реальной грунтовой среды.

При всем различии механических характеристик грунтового основания, описываемого моделями коэффициента постели, линейно деформируемого и двухпараметрового оснований, оказывается возможным установить взаимосвязь между ними. Знание условий перехода от одних характеристик к другим может быть полезным при сопоставлении результатов расчетов с применением различных моделей.

Используя известные формулы, связывающие осадки круглого штампа с характеристиками соответственно линейно деформируемого и двухпараметрового оснований, в работе получено выражение для определения модуля деформации E в зависимости от параметра C_I - сопротивления основания сжатию и $s = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$, где C_2 - параметр сопротивления основания сдвигу

$$E = \frac{\pi D}{4} (1 - \mu^2) \left[1 + 2 \frac{s}{r} \cdot \frac{K_1(\frac{r}{s})}{K_0(\frac{r}{s})} \right] C_1. \quad (I)$$

Выражение для коэффициента постели K_b имеет вид:

$$K_b = \frac{P_0}{\omega_0} = \left[1 + 2 \frac{s}{r} \cdot \frac{K_1\left(\frac{r}{s}\right)}{K_0\left(\frac{r}{s}\right)} \right] C_1. \quad (2)$$

Здесь: D и r - соответственно диаметр и радиус фундамента (штампа), $K_1\left(\frac{r}{s}\right)$ и $K_0\left(\frac{r}{s}\right)$ - некоторые цилиндрические функции.

Придавая параметрам C_I и C_2 значения, вычисленные по результатам испытаний грунтового основания штампом, по формуле (1) получаем то же значение модуля деформации, что и по известным формулам Буссинеска, Шлейхера.

Параметры $C_{I(лд)}$ и $C_{2(лд)}$ линейно деформируемой среды могут быть определены по полученным в работе зависимостям; первый с учетом расчетной глубины зоны сжатия $H_{0(лд)}$, второй с помощью вспомогательного параметра $U_{(лд)}$:

$$U_{(лд)} = \frac{E}{\pi(1-\mu^2)C_{1(лд)}} - \frac{D}{4} \quad (3)$$

и приведенного в работе графика функции $S_{(лд)} = f(U_{(лд)})$.

Сопоставление параметров C_I , C_2 и S - фактических и рассчитанных по теории линейно деформируемой среды показывает, что высокая распределяющая способность теоретической сплошной среды, вызывая преувеличение расчетной глубины зоны сжатия $H_{0(лд)}$ в сравнении с действительной, приводит к преуменьшению расчетного параметра $C_{I(лд)}$ сопротивления основания сжатию и одновременно к преувеличению расчетного параметра $C_{2(лд)}$ сопротивления основания сдвигу; следствием такого перераспределения величин параметров $C_{I(лд)}$ и $C_{2(лд)}$ является преувеличение эффекта влияния прилегающей к фундаменту (штампу) ненагруженной области основания, отражаясь, как было отмечено выше, на форме кривой эпюры реактивного отпора основания.

Определив для данных конкретных условий численные значения параметров C_1 , C_2 и S , соответствующие линейно деформируемой среде, двухпараметровой модели и коэффициент постели K модели Винклера, а затем сопоставив их, можно принять наиболее приемлемую для этих условий расчетную модель основания.

В заключительном параграфе первой главы рассматриваются вопросы учета необратимых и упругих деформаций грунтов в связи с выбором целесообразной модели основания. На примере анализа результатов натурных экспериментов показано, что в тех случаях, когда имеет место значительные местные (необратимые) деформации уплотнения грунта под штампом, отношения между ними и упругими составляющими общей деформации основания под штампом и за его пределами будут существенно различаться; отсюда, характеристики основания, определенные исходя из полных осадок основания под штампом, не смогут считаться достаточно достоверно отражающими характер деформирования всего основания. При относительно больших местных (необратимых) деформациях смешивание модели основания, позволяющие отдельно учитывать необратимые и упругие деформации, могут оказаться более приемлемыми.

Во второй главе рассматриваются разработанные автором диссертации "функциональные дискретные цепные модели грунтового основания" с двумя параметрами и излагаются численные методы расчета осадок основания, представленного этими моделями.

Сформулированы основные требования к моделям основания. При этом подчеркивается, что в связи с большой сложностью грунтовой среды, практической невозможностью моделировать сложную структуру грунта следует построить модель, по возможности изоморфную грунтовому основанию по "поведению", т.е. по характеру его деформирования при воздействии различных нагрузок. Построе-

ние модели, названной в этом смысле функциональной, выполнено на основе следующих исходных предпосылок:

- моделирование основания производится исходя из дискретного принципа, вместо принципа непрерывности, который положен в основу упомянутых выше моделей основания, рассматриваемых как континуальные системы. В соответствии с этим континуальная математическая модель основания заменяется его дискретной моделью в виде системы сопряженных ^{между} сособов функциональных линейно деформирующихся упругих элементов-связей;

- между элементами модели и основными характеристиками грунтового основания устанавливается прямая связь: соответствующие элементы модели получают значения показателей жесткости отвечающих им характеристик грунтового основания;

- модель грунтового основания, имитируемая одноярусной бесконечной цепью связей, описывается двумя параметрами в смысле П.Л.Пастернака - в интегральной форме, на поверхности основания; в многоярусных моделях характеристики жесткости связей отвечают соответствующим по мощности и показателям слоям основания. В обоих случаях моделируются условия деформирования основания только в вертикальном направлении. Вместе с тем это не означает, что влияние горизонтальных напряжений σ_x и σ_y на деформации основания в вертикальном направлении игнорируется. Параметры C_I и C_2 сопротивления основания вертикальным соответственно сжатию и сдвигу определяются по результатам полевых испытаний грунтового основания штампом, т.е. в природных условиях, когда влияние σ_x и σ_y на величины параметров C_I и C_2 фактически проявляется. Не будучи, однако, отражено в двухпараметровой модели непосредственно, это влияние учитывается косвенно, так как оно приписы-

вается показателям сопротивления основания сдвигу в вертикальном направлении;

- сочетание основания, имитируемого системой дискретных связей сдвига и сдвига, с фундаментной конструкцией осуществляется не непрерывно, а по предложению Б.Н.Жемочкина - в группе точек.

Согласно изложенному выше, столбцы основания представлены в предлагаемой модели двумя видами связей: системой пружин-связей сдвига с показателями жесткости K_{δ} и пружин-связей сдвига с показателями жесткости C_{δ} . Все пружины-связи, будучи последовательно сопряжены между собой, образуют единую неразрывную, при необходимости бесконечную цепь попеременно чередующихся связей сдвига и сдвига. Условие деформируемости системы только в вертикальном направлении выполняется введением в модель "служебных" жестких элементов, способных только передавать вдоль цепи усилия и перемещения по вертикали, но лишенных возможности деформироваться или поворачиваться. В работе приведены схемы модели для различных расчетных случаев:

а. Одноярусная одномерная модель (с интегральными показателями жесткости основания) в виде одной бесконечной, полубесконечной цепи или участка цепи связей с конечным числом звеньев (рис.1). Такими цепями моделируется основание в условиях плоской задачи для бесконечной (неограниченно простирающейся в обе стороны от участка приложения нагрузки) полуплоскости, четверти плоскости или участка полуплоскости. Придавая соответствующим пружинам-связям одинаковые значения показателей жесткости, получаем однородное основание, а различные - неравномерно сжимаемое.

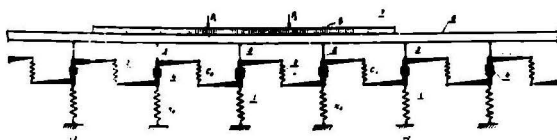


Рис.1. Одноярусная модель двухмерного основания.

- 1 - связи скатия с интегральными характеристиками K_i ;
 2 - связи сдвига с интегральными характеристиками C_i ;
 3 - недеформируемые рычажные элементы; 4 - односторонние направляющие; 5 - жесткие опорные стержни; 6 - балка;
 7 - нагрузка.

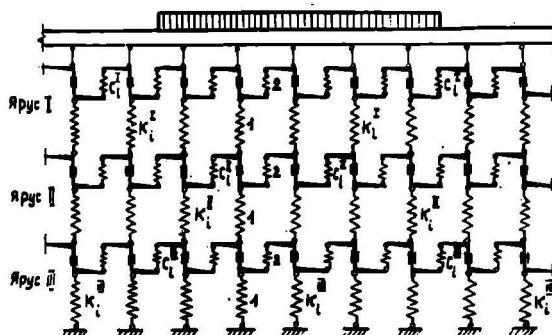


Рис.2. Многоярусная модель двухмерного однородного или многослойного основания.

- 1 - связи скатия ярусов I, II, III; 2 - связи сдвига ярусов I, II, III.

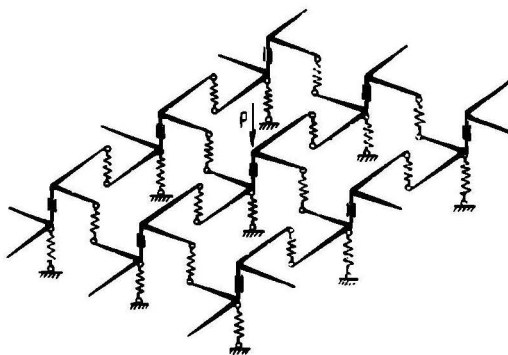


Рис.3. Одноярусная модель трехмерного основания (полупространство). Схема цепей связей.

НТБ
ДНУЖТ

б. Сохраняя принятый принцип построения модели, можно сформировать двух - или многоярусную модель, имитирующую соответственно двух - или многослойное основание, или слой конечной глубины (рис. 2). Такие модели могут быть использованы для расчета осадок поверхности основания или отдельных слоев, а также для определения внутренних усилий во всей области деформирования основания.

в. Развитие системы связей в двух перпендикулярных направлениях в плане (рис. 3) или по радиально-кольцевой сетке для одноярусной или многоярусной систем вертикальных связей позволит моделировать полупространство, четверть или участок полупространства.

Замена непрерывной системы (грунтовой среды) предлагаемой автором дискретной системой функциональных элементов приводит (что и является одной из важных задач дискретизации) к использованию аппарата линейной алгебры, минуя стадию составления дифференциальных уравнений (неизбежную при рассмотрении среды как непрерывной системы) и переход к приближенным способам их решения.

При составлении расчетных зависимостей вводятся понятия об "эквивалентной (приведенной) жесткости" цепи, участка цепи или отдельных звеньев связей; оно имеет тот смысл, что для любого рассматриваемого нагруженного узла цепи определяется показатель сопротивления цепи (бесконечной, конечного участка цепи или отдельного звена, состоящего из двух последовательно сопряженных связей сжатия и сдвига), которое соответствующая совокупность связей оказывает осадке данного нагруженного узла.

Выражение для определения эквивалентной жесткости C_{ϕ} участка полупереи (половины цепи), состоящей из n звеньев, с постоян-

ными вдоль цепи значениями жесткостей связей сжатия K_0 и сдвига C_0 (однородное основание), имеет вид:

$$C_{\phi n} = \frac{C_0 [K_0 + C_{\phi(n-1)}]}{C_0 + K_0 + C_{\phi(n-1)}}. \quad (4)$$

В работе показано, что последовательность $\{C_{\phi n}\}_{n=1}^{\infty}$, определяемая формулой (4), положительна, монотонно возрастает и ограничена сверху; следовательно, существует предел:

$$C_{\phi\infty} = \lim_{n \rightarrow \infty} C_{\phi n}. \quad (5)$$

Перейдя к пределу в равенстве (4), получим зависимость для определения эквивалентной жесткости полубесконечной цепи связей:

$$C_{\phi n} = \pm \frac{K_0}{2} + \sqrt{\frac{K_0^2}{4} + C_0 K_0}. \quad (6)$$

Знак при первом члене формулы (6) принимается плюс, если первым элементом полупетли является связь сжатия, минус, если связь сдвига.

Эквивалентная жесткость бесконечной (полной) цепи связей выразится в виде:

$$\sum_{n \rightarrow \infty} C_{\phi n} = 2 \sqrt{\frac{K_0^2}{4} + C_0 K_0} \quad (7)$$

Осадки узлов бесконечной цепи от сосредоточенной силы, приложенной к одному из узлов (обозначим его номером I), вычисляются по формуле:

$$\omega_m = \omega_1 \beta^{m-1} \quad (8)$$

Здесь ω_1 — осадка нагруженного узла I:

$$\omega_1 = \frac{P}{\sum_{n \rightarrow \infty} C_{\phi n}}, \quad (9)$$

β - коэффициент затухания осадок основания; последний определяется из выражения:

$$\beta = \frac{C_0}{C_0 + C_{\phi n}}, \quad (10)$$

где $C_{\phi n}$ вычисляется по формуле (6), со знаком плюс при первом члене.

Усилия в элементах цепи находятся из следующих выражений: в связи сжатия, расположенной в нагруженном узле:

$$R_1 = P \frac{K_0}{\sum_{n \rightarrow \infty} C_{\phi n}}; \quad (11)$$

в прочих связях сжатия:

$$R_m = R_1 \beta^{m-1}; \quad (12)$$

в связях сдвига:

$$R_{m,m+1} = P \frac{\beta^m}{2 - \frac{K_0}{C_{\phi n}}}. \quad (13)$$

Расчет осадок основания в виде четверти плоскости или участка полуплоскости, представленных соответственно полубесконечной цепью или участком цепи с n звеньев связей, производится по полученным в работе зависимостям для определения эквивалентной жесткости участка цепи из n звеньев связей и эквивалентной жесткости остаточного участка цепи (от n до ∞).

Приведем выражение для первого

$$C_{\phi n} = C_{\phi n} \frac{1 - \beta^{2n}}{1 + \beta^{2n-1}} \quad (14)$$

и для второго:

$$C_{\phi \text{ост}} = C_{\phi n} \frac{\beta^{2n-1} (1 + \beta)}{1 + \beta^{2n-1}}. \quad (15)$$

При $n \rightarrow \infty$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 - \beta^{2n}}{1 + \beta^{2n-1}} = 1$; соответственно, при $n \rightarrow 0$
 $\lim_{n \rightarrow 0} \frac{\beta^{2n-1}(1 + \beta)}{1 + \beta^{2n-1}} = 1$, что подтверждает правильность (14) и
 (15)

Эквивалентная жесткость цепи связей относительно узла I, по одну сторону от которого располагается полубесконечная цепь связей, а по другую конечный участок с $n-t$ звеньев, определяется из выражения:

$$\sum C_{\phi n} = C_{\phi t} + C_{\phi n} - K_0 = 1 + \left(\frac{1 - \beta^{2t}}{1 + \beta^{2t-1}} \right) C_{\phi n} - K_0. \quad (16)$$

Осадка узла I (под силой): $\omega_1 = \frac{P}{\sum C_{\phi n}}$.

Осадки прочих узлов:

в ветви с конечным числом звеньев t

$$\omega_m = \omega_1 \beta_t^{m-1} \quad (17)$$

$$\text{где } \beta_t = \frac{C_0}{C_0 + C_{\phi t}}; \quad (18)$$

в полубесконечной ветви:

$$\omega_m = \omega_1 \beta_{n \rightarrow \infty}^{m-1}, \quad (19)$$

$$\text{где } \beta_{n \rightarrow \infty} = \frac{C_0}{C_0 + C_{\phi n}} \quad (20)$$

Расчет осадок узлов цепи с конечным числом звеньев по обе стороны от данного нагруженного узла производится аналогично изложенному, но с учетом эквивалентных жесткостей обеих ветвей участка цепи и соответствующих им коэффициентов затухания осадок.

Приведенные зависимости позволяют определять осадки плоскости с перечисленными выше различными граничными условиями, не вызывая при расчете осложнений, неизбежных в решениях анало-

гичных задач в континуальной постановке. Выполнив для неограниченной полуплоскости переход от дискретных значений ширины столбцов к их значениям равным dx , приходим к выражениям, совпадающим с решением П.Л.Пастернака.

Составлены зависимости и составлен алгоритм расчета осадок двухмерного неравномерно сжимаемого основания, имитируемого цепью с переменными характеристиками связей статия K_i и сдвига C_i . Использование предложенного для этой цели способа последовательного присоединения звеньев при расчете эквивалентных жесткостей дискретной цепи связей относительно нагруженных узлов не обуславливается требованиями, чтобы характеристики жесткости связей вдоль цепи подчинялись какой-либо функциональной зависимости.

В работе рассмотрен также случай, когда в систему цепи связей включаются жесткие связи (опоры).

Составлены зависимости для решения задачи о расчете осадок двухмерного двухслойного основания; рассмотрены случаи, когда верхний ярус представлен связями по винклеровской схеме, а нижний - дискретной цепью связей, либо, когда оба яруса представлены дискретными цепями с различными соответствующими данным ярусам (слоям основания) характеристиками связей. Во втором случае верхний ярус может быть представлен бесконечной цепью или участком ограниченного протяжения.

Получены формулы для определения работы деформаций внешних и внутренних сил двухмерного основания (для континуальной и дискретной моделей). При приложении к бесконечной дискретной цепи единичного сосредоточенного груза работа внутренних сил в связях статия и сдвига на собственных перемещениях находится

из выражения:

$$\Sigma A_{(кс)} = \frac{K_0}{\left(\sum_{n \rightarrow \infty} C_{\phi n}\right)^2} \left(\frac{2}{1-\beta^2} - 1\right) + \frac{2}{C_0} \left(\frac{1}{2 - \frac{K_0}{C_{\phi n}}}\right)^2 \frac{\beta^2}{1-\beta^2}. \quad (21)$$

формулы для вычисления работы деформации внешних и внутренних сил используются для ускоренного контроля правильности расчета усилий и перемещений элементов цепи.

Получено приближенное решение задачи о расчете осадок трехмерного основания, представленного дискретной моделью, при его нагружении гибкой нагрузкой по протяженной полосе; в этой задаче, учитывая указанные условия нагружения, трехмерное основание приводится к эквивалентному двумерному. Участие примыкающей в поперечном направлении ненагруженной области основания в работе нагруженного участка выражается коэффициентом эквивалентности γ , который определяется из следующей зависимости:

$$\gamma = \frac{1}{1 - \frac{2\alpha_0}{\alpha \left(2 - \frac{K_0}{C_{\phi n}}\right)} \cdot \frac{\beta(1-\beta^n)}{1-\beta}} \quad (22)$$

Далее расчет в продольном направлении производится с учетом эквивалентной ширины основания $\alpha_{эв} = \gamma\alpha$, как для двумерного основания.

В формуле (22) кроме ранее обозначенных:

α - ширина нагруженной полосы; α_0 - ширина дискретного столба основания; n - номер последнего нагруженного узла участка нагружения цепи в поперечном направлении.

Применение зависимостей, полученных в настоящей главе, иллюстрируется рядом численных примеров.

НГБ
ДНУЖТ

Третья глава посвящена составлению зависимостей для решения некоторых контактных задач о расчете полос на двухмерном основании, а также протяженных полос на трехмерном основании.

Зависимость для расчета прямых перемещений узлов дискретной цепи от групповых сил $\bar{X}_0 = \frac{1}{\alpha_0(2m-1)}$, приложенных на участке α_0 , в пределах которого располагается $\alpha_0(2m-1)$ узлов цепи, имеет вид:

$$\Delta_{ii} = \frac{2}{\alpha_0(2m-1) \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{\phi n}} \left(\frac{1-\beta^m}{1-\beta} - \frac{1}{2} \right). \quad (23)$$

То же для определения побочных перемещений:

$$\Delta_{ik} = \frac{\beta^{n^*-i}}{\alpha_0(2m-1) \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{\phi n}} \cdot \frac{1-\beta^{2m-1}}{1-\beta}. \quad (24)$$

где кроме ранее указанных: i - узел, для которого ищется осадка; n^* - ближайший к нему нагруженный узел.

Формулы (23) и (24) могут быть в несколько измененном виде использованы для расчета осадок двухмерного основания от групповых сил P ; в работе приведены выражения для осадок точек поверхности, расположенных в центре, внутри и вне пределов нагруженного участка.

Разработан приближенный способ решения контактной задачи для протяженной полосы на трехмерном основании, представленном одноярусной дискретной моделью.

Для случая, когда ленточный фундамент имеет в поперечном направлении бесконечную жесткость, а в продольном конечную или бесконечную, эквивалентная ширина полосы трехмерного основания вычисляется по формуле:

$$\alpha_{эв} = \frac{\alpha}{1 - \frac{\frac{\alpha}{\alpha_0} K_0 + 2\sqrt{\frac{K_0^2}{4} + K_0 C_0}}{2\sqrt{\frac{K_0^2}{4} + K_0 C_0}}} \quad (25)$$

Далее расчет полосы в продольном направлении ведется как для плоской задачи, но с учетом $\alpha_{жв}$; найденные из этого расчета реакции основания прикладываются как внешние нагрузки к жесткой полосе в поперечном направлении; таким образом находятся криволинейные эпюры отпора основания в обоих направлениях.

Решение контактных задач производится на основе предложения Б.Н. Жемочкина о контакте фундаментной конструкции с основанием в группе точек (в узлах цепи связей). Система алгебраических уравнений совместности деформаций разрешается на ЭВМ по готовым программам.

Глава завершается примером расчета армированного жесткого ленточного штампа на трехмерном основании, представленном дискретной моделью. Для сопоставления выполнены расчеты по моделям линейно деформируемой среды и Винклера; расчет по дискретной модели по сравнению с расчетом по теории линейно деформируемой среды дает, как и следовало ожидать, меньшие величины усилий.

В четвертой главе описываются результаты пяти натуральных экспериментов - испытаний грунтового основания стальными цельносварными штампами - круглыми $D = 1,0$ м и ленточными $3,0 \times 0,6$ м. Эксперименты проводились в районе г. Кременчуга на лессовидных пылеватых суглинках с природной влажностью 13,25% и коэффициентом пористости 1,06. Штампы устанавливались на спланированную площадку, на отметке минус 0,8 м от поверхности; боковая пригрузка отсутствовала.

Испытания выполнялись с помощью гидродомкрата и грузовой платформы по схеме нагрузка-разгрузка (для получения данных об остаточной и упругой составляющих осадок) в следующей последовательности (давления в кг/см²): 0 - 0,4 - 0; 0 - 0,4 - 0,8 - 0;

0 - 0,8 - 1,2 - 0; 0-1,2 - 1,6 - 0; 0-1,6 - 2,0 - 0 (2,0 кг/см² - предельное состояние). Все ступени нагрузки и разгрузки выдерживались до условной стабилизации осадок штампов, в соответствии с требованиями ГОСТ 12374, 1966 г. Наблюдения за деформациями велись с помощью прогибомеров и индикаторов часового типа.

Эксперименты, произведенные по широкой программе, после их обработки и анализа позволили получить следующие данные на всех стадиях нагружения:

- полные, упругие и остаточные осадки штампа и поверхности основания за его пределами;
- полные, упругие и остаточные деформации грунта во всей области деформирования основания;
- численные значения коэффициентов постели, модулей деформации, интегральных параметров основания на сжатие и сдвиг из учета полных, а также отдельно упругих и остаточных составляющих деформаций.

Основные результаты испытаний сводятся к следующему:

1. Выявлена взаимосвязь между осадками штампов, окружающей поверхности и глубинными деформациями в процессе их развития с ростом нагрузок, во всей области деформирования основания.

2. Получены данные о глубинах и области распространения зон полных и остаточных деформаций при различных стадиях нагружения; установлено, что граница зоны деформаций сжатия в пределах участка нагружения имеет существенно выраженную кривизну.

3. Получены данные о характере затухания упругих деформаций в пределах всей области наблюдений.

4. Во всех экспериментах за пределами зоны деформаций сжатия выявлено наличие областей "разуплотнения" - участков с отри-

пательными (знак растяжения) вертикальными деформациями - полными и остаточными. В работе изложены соображения автора о возможных причинах и влиянии эффекта разуплотнения на величины расчетных механических характеристик основания.

5. Результаты экспериментов, перечисленные в п.п. I-4, в обобщенном виде представлены на картах изолиний полных, упругих и остаточных деформаций, а также изолиний отношений остаточных деформаций к полным, охватывающие всю область деформирования (зоны деформаций сжатия и разуплотнения).

Семейства изолиний в разных стадиях нагружения отражают качественную и количественную картину процесса развития деформаций основания.

6. Остаточные деформации играют важную роль в процессе развития осадок; появляясь уже на ранней стадии нагружения, они при нагрузке $2,0 \text{ кг/см}^2$ достигают 79,5% полной деформации. Остаточные осадки носят, главным образом, местный характер, концентрируясь в некоторой зоне под штампом; эти данные хорошо согласуются с результатами других исследований (И.И.Черкасов и др.).

7. Определены численные значения коэффициентов постели, модулей деформации, интегральных параметров сопротивления основания сжатию и сдвигу во всех стадиях нагружения; эти показатели вычислены по общим, упругим и остаточным деформациям. С ростом нагрузки стабильности показателей не наблюдается, что объясняется возрастающим влиянием доли нелинейно развивающихся необратимых деформаций; величины параметра сопротивления основания сдвигу, определенные из учета остаточных деформаций, очень малы, а показатели модуля упругих деформаций и параметра на сжатие, вычисленных по упругим составляющим, значительно выше, чем по

полным. Оба эти обстоятельства свидетельствуют о целесообразности раздельного учета характеристик.

В пятой главе излагается предложение автора по методике определения характеристик двухпараметрового основания. Полученные зависимости основаны на использовании результатов обычных штамповых испытаний и данных о глубине зоны деформаций сжатия под штампом; при отсутствии последних может быть применена эмпирическая формула для определения фактических глубин сжатой зоны (П.А.Коновалова, НИИ Оснований), нуждающаяся, по мнению автора, в уточнении применительно к различным грунтовым и др. условиям.

Предлагаемая методика не требует производства замеров сравнительно малых и быстро затухающих осадок поверхности за пределами штампа, что необходимо для определения показателей по методике Л.И.Мамвелова. Это существенно упрощает штамповые испытания; в ряде случаев повышается достоверность данных.

Параметр сопротивления основания сжатию $C_{1(\phi)}$ определяется по формуле:

$$C_{1(\phi)} = \frac{E}{H_{o(\phi)} (1 - \mu^2)} \quad (26)$$

Здесь: E - модуль деформации основания, вычисляемый по формуле действующего ГОСТ по результатам штамповых испытаний:

$H_{o(\phi)}$ - фактическая глубина зоны деформаций сжатия под штампом;
 μ - коэффициент поперечного расширения грунта.

Зная $C_{1(\phi)}$ по формуле (3) определяем значение вспомогательного параметра $U_{(\phi)}$, подставив в нее $C_{1(\phi)}$ вместо $C_{1(ЛД)}$. Пользуясь приведенным в работе графиком зависимости $S = f(U)$, находим $S_{(\phi)}$ и вычисляем значение параметра $C_{2(\phi)}$ сопротивления основания сдвигу:

$$C_{2(\phi)} = S_{(\phi)}^2 C_{1(\phi)} \quad (27)$$

Предлагаемая методика позволяет определять параметры C_1 , C_2 и K_b при диаметрах фундаментов (штампов), отличающихся от опытного, если известна зависимость фактической глубины зоны деформаций скатия от диаметра фундамента. Используя упомянутую эмпирическую зависимость П.А.Коновалова, получим следующие выражения:

- для определения параметра C_{1i} :

$$C_{1i} = \frac{E(1+0,001E)}{\rho_0 \left(\sqrt{\frac{\pi}{4}} D_i - m \right) (1-\mu^2)} ; \quad (28)$$

- для определения вспомогательного параметра U_i :

$$U_i = \frac{2\rho_0 \sqrt{\frac{1}{\pi}} - (1+0,001E)}{4(1+0,001E)} D_i - \frac{\rho_0 m}{\pi(1+0,001E)} . \quad (29)$$

Параметр s_{2i} находится по упомянутому выше графику $s=f(U)$, приведенному в работе; параметр C_{2i} вычисляется по формуле (27).

Приведем формулу для определения коэффициента постели K_{bi} :

$$K_{bi} = \left(1 + \frac{4}{D_i} U_i \right) C_{1i} \quad (30)$$

В формулах (28), (29), кроме известных обозначений:

ρ_0 - нормативное удельное давление на основание,

m - численный коэффициент, зависящий от площади фундамента.

Кроме приведенных, в работе даны зависимости для определения параметров C_1 и C_2 на учета отдельно остаточных и упругих составляющих осадок.

Полученные в соответствии с предлагаемой методикой зависимости иллюстрируются примерами расчета и графиками; произведенное сопоставление параметров, вычисленных по предлагаемой методике и по Л.И.Мавзелову, показало, что расхождения между ними находятся в допустимых пределах (2,6 - 11,7%).

Сопоставление параметров C_1 и C_2 для грунтового основания и линейно деформируемой среды подтверждает выводы автора по этому вопросу, изложенные в главе I (см. выше).

Для распространения зависимостей на фундаменты с большей площадью ($F > 40000 \text{ см}^2$) следует обобщить накопленный экспериментальный материал и в случае необходимости произвести дополнительные полевые испытания в различных грунтовых условиях.

Основные результаты и выводы

1. Выполнен анализ распространенных в инженерной практике и других известных моделей основания - Винклера, линейно деформируемой среды, основания с двумя параметрами, со смешанными свойствами; особенности различных моделей рассмотрены во взаимосвязи с соответствующими характеристиками грунта.

Получены зависимости для перехода от одних характеристик к другим, что позволяет путем их прямого сопоставления производить выбор модели, наиболее отвечающей данным конкретным условиям задачи и грунтовым условиям.

2. Разработана модель грунтового основания в виде системы попеременно чередующихся взаимно сопряженных дискретных связей с показателями жесткости, отвечающими сопротивлению основания сжатию и сдвигу. Предложены различные модификации модели, имитирующие полуплоскость (полупространство), четверть плоскости (пространства), участок полуплоскости (полупространства), двух - или многослойное основание.

3. На основе предлагаемой модели разработаны численные методы расчета осадок однородного и неравномерно сжимаемого двухмерного основания для случаев неограниченно простирающейся полуплоскости, четверти плоскости и участка полуплоскости. Применение предложенного в расчете осадок неравномерно сжимаемого основания способа последовательного присоединения связей не обуславливается требованием, чтобы характеристики жесткости сжатия и сдвига элементов цепи связей подчинялись какой-либо функциональной зависимости. Рассмотрен случай, когда в систему цепи связей включены жесткие связи-опоры.

4. Получено приближенное решение задачи о расчете осадок трехмерного основания (полупространства), представленного дискретной моделью, от гибкой нагрузки по протяженной полосе (приведение трехмерной задачи к двумерной).

5. Рассмотрены задачи расчета осадок двухслойного двухмерного основания, имитируемого двухъярусной системой дискретных связей, с различными для каждого слоя характеристиками.

6. Составлены зависимости для решения некоторых контактных задач (определение прямых и побочных перемещений от групповых сил, приложенных к поверхности полуплоскости, четверти или участка полуплоскости). Получено приближенное решение задачи о расчете осадок трехмерного основания и определении контактных давлений для протяженной полосы конечной или бесконечной жесткости; решение позволяет получать криволинейные эпюры отпора основания в обоих направлениях.

7. В результате проведенных натурных экспериментальных исследований — испытаний грунтового основания круглыми и ленточными штампами выявлена взаимосвязь между осадками штампов, окру-

жающей поверхности и глубинными деформациями во всех стадиях нагружения; получены данные о глубине зон деформаций сжатия, форме кривой границы зоны; выявлено наличие областей "разуплотнения"; определены и сопоставлены характеристики коэффициентов постели, модулей деформации, интегральных параметров сжатия и сдвига из учета полных и раздельно остаточных и упругих осадок; установлено значительное влияние местных необратимых осадок на величины характеристик, что подтверждается другими исследованиями. Результаты экспериментов в обобщенном виде представлены изолиниями полных, остаточных и упругих деформаций основания всей области деформирования основания.

8. Предложена методика определения характеристик двухпараметрового основания. Полученные зависимости основаны на использовании результатов обычных штамповых испытаний и данных о фактической глубине зоны деформаций сжатия под штампом; при этом отпадает необходимость в производстве замеров осадок окружающей поверхности, что требуется по существующей методике Л.И.Мавзенова.

Получены зависимости для определения параметров сопротивления основания сжатию, сдвигу и коэффициента постели в зависимости от диаметра фундамента (штампа).

В дальнейшем целесообразно эти зависимости уточнить для различных грунтовых условий и формы штампов, а также расширить область их возможного использования (для площадей более 40000 см²).

9. Представление основания в виде дискретной системы связей с двумя параметрами жесткости, как это сделано в диссертации, автор рассматривает как первую стадию работ по моделированию непрерывной среды (континуальной системы) на основе изложенных

в работе принципов и приемов. Разработка функциональных моделей с большим числом связей, ориентированных по соответствующим осям, позволит, естественно, более полно учитывать свойства и особенности деформирования среды. Практические расчеты таких сложных дискретных систем, с большим (но конечным) числом параметров, в будущем возможны, по мнению автора, на основе использования методов электрической аналогии, поскольку предлагаемые дискретные системы элементов-связей могут быть непосредственно идентифицированы эквивалентными им электрическими цепями.

Основные результаты, полученные в работе, опубликованы в статьях:

1. А.М.Гельфандбейн. Дискретная цепная модель грунтового основания и численный метод решения некоторых контактных задач. Сборник "Расчеты строительных конструкций" Института Харьковский Промстройинипроект, Госстройиздат, 1968 г.

2. А.М.Гельфандбейн. Контактная задача и некоторые вопросы взаимосвязи моделей основания с механическими характеристиками грунта. Сборник Института Уральский Промстройинипроект, издательство "Уральский Рабочий" (находится в печати).

3. А.М.Гельфандбейн. Методика определения параметров грунтового основания с двумя характеристиками. Научное сообщение "Деформационные характеристики грунтов". Издательство "БудІвельник", г.Киев (находится в печати).

4. А.М.Гельфандбейн. Дискретная цепная модель грунтового основания. Научно-техническая информация. Издательство ЦИНИС Госстроя СССР, 1968 г.

5. А.М.Гельфандбейн. Полевые испытания грунтового основания круглым и ленточным штампами. Научно-техническая информация. Издательство ЦИНИС Госстроя СССР, 1968 г.

Диссертация по частям докладывалась:

1. На коллоквиуме секции механики грунтов НТО Научно-исследовательского Института Оснований и Подземных Сооружений, г.Москва, апрель 1967 г.

2. На научных семинарах кафедры "Основания, фундаменты и подземные сооружения" Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, г.Днепропетровск, февраль 1967 г., январь 1968 .

3. На научном семинаре лаборатории гидротехнических сооружений Харьковских научно-исследовательских лабораторий института ВНИИГИМ, апрель 1967 г.

4. На научной конференции Харьковского Инженерно-Строительного института, г.Харьков, май 1968 г.

5. На техническом семинаре секции оснований и фундаментов Харьковского областного правления НТО Стройиндустрии, г.Харьков, май 1968 г.

НТБ
ДНУЖТ

Ответственный за выпуск канд.техн.наук Н.А.Осташев

БЦ 31635

Подписано к печати 12.XI. 1968 г.

Формат 60х84 физ.п.л.

Усл.п.л. 1.15

Заказ № 730

Тираж 200 экз.

Отпечатано на ротопринтере Харьковского Промстройинипроекта
(Харьков, пл.Дзержинского № 8)

Сканировала Камянская Н.А.