

На правах рукописи



Шохирев Максим Витальевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ДВУХСЛОЙНЫХ ОСНОВАНИЙ ФУНДАМЕНТОВ
АНАЛИТИЧЕСКИМИ И ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Караулов Александр Михайлович

Официальные оппоненты: **Богомолов Александр Николаевич**
доктор технических наук, профессор

Краев Алексей Николаевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет», доцент кафедры «Строительные
конструкции»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I»

Защита состоится 12 декабря 2024 года в 10:00 часов (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.419.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте <http://www.tyuiu.ru>.

Автореферат разослан «30» октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Степанов Максим Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Интенсивное развитие промышленного, гражданского и транспортного строительства в нашей стране связано с освоением новых территорий и внедрением новых технологий и конструкций в фундаментостроении. Совершенствование методов расчета грунтовых оснований приобретает первостепенное значение для обеспечения надежности фундаментной части инженерных сооружений. Следует отметить, что многие реальные объекты возводятся на основаниях, представленных напластованием различных грунтов. Разработка методов расчета многослойных оснований в общем комплексе проблем имеет особое значение.

Одной из важнейших характеристик грунтового основания, в частности, для фундаментов мелкого заложения, является их несущая способность. Статический метод ТПРГ (теория предельного равновесия грунтов) - это теоретическая база для определения предельной нагрузки. Решения статики сыпучей среды для однородных оснований апробированы многолетней практикой и включены в нормативную литературу по проектированию фундаментов мелкого заложения.

Для многослойных оснований методика расчета несущей способности, основанная на решениях статики сыпучей среды отсутствует. Общий подход к расчету несущей способности двухслойных оснований, представляющих простейший случай неоднородности, до сих пор не выработан, и разработка его является актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Обращаясь к распространенному в строительной практике случаю многослойных оснований, можно отметить следующее. Для определения деформаций таких оснований, а именно – осадок и кренов фундаментов мелкого заложения, нормативная литература обеспечена необходимыми расчетными методами. В части оценки несущей способности оснований строгие решения ТПРГ имеются только для однородного основания и двухслойного основания с жестким подстилающим слоем. В общем случае рекомендуется использовать приближенные методы для расчёта несущей способности, одним из таких методов является метод логарифмической спирали. При этом алгоритмы расчета не конкретизируются. Конечно, здесь остается область численного конечноэлементного моделирования, в рамках которого можно рассчитывать и многослойные основания. Однако, результаты таких расчетов нуждаются в верификации, т.е. сравнении с аналитическими методами. В последнее время стали появляться приближенные решения, посвященные частным случаям двухслойных оснований с использованием специальных расчетных схем. Необходимость разработки общего подхода к решению данной проблемы представляется необходимой. Именно этому посвящена данная работа.

Объектом исследования являются основания фундаментов мелкого заложения, состоящие из двух слоев грунта.

Предметом исследования является предельное давление на основания фундаментов мелкого заложения, состоящие из двух слоев грунта.

Цель диссертационной работы. Разработать аналитическую методику определения предельного давления на основание фундаментов мелкого заложения,

состоящее из двух слоев грунта, с использованием метода логарифмической спирали.

Задачи исследований.

1. Разработать метод определения предельного давления на основание, состоящее из двух слоев грунта, с использованием строгого решения статики сыпучей среды и метода логарифмической спирали для двух схем: подстилающий слой слабее несущего, подстилающий слой прочнее несущего.

2. Выполнить экспериментальные исследования схемы разрушения двухслойного грунтового основания и установить зависимость предельного давления на основание от глубины залегания подстилающего слоя.

3. Выполнить численное моделирование предельной стадии деформирования двухслойного грунтового основания и сопоставить результаты численного моделирования с данными экспериментов и результатами теоретических решений.

4. Разработать практический метод оценки несущей способности двухслойного основания.

Научная новизна работы заключается в комплексном подходе к определению предельного давления на основание, состоящее из двух слоев грунта, приближенными и численными методами. В частности:

1. Дано новое решение задачи о предельном давлении на основания, состоящие из двух слоев грунта, методом логарифмической спирали;

2. Установлены закономерности влияния глубины залегания подстилающего слоя на величину предельного давления и на форму областей предельного напряженного состояния;

3. Получены новые экспериментальные данные о влиянии глубины залегания слабого подстилающего слоя на значение предельной нагрузки и характер формирования области выпора в основании;

4. Показана корректность применения метода предельного анализа к решению данного класса задач, а также выявлены некоторые проблемы построения аналогичных решений методом конечных элементов.

Теоретическая значимость работы заключается в разработанном методе определения предельного давления фундаментов мелкого заложения на двухслойные грунтовые основания, основанном на совместном использовании строгих решений статики сыпучей среды и приближенной оценке устойчивости оснований методом логарифмической спирали, на введении нового параметра – коэффициента влияния подстилающего слоя, на экспериментальной проверке характера зоны выпора двухслойного основания.

Практическая значимость работы заключается в разработанных рекомендациях по расчету предельного давления фундаментов мелкого заложения на двухслойные грунтовые основания. Эти рекомендации обеспечены следующими разработками.

1. Разработана и сертифицирована программа для ЭВМ.

2. Разработан метод учета угла наклона и эксцентриситета нагрузки на несущую способность двухслойных оснований и даны рекомендации для практических расчетов.

3. Показано, что для оценки несущей способности двухслойного основания метод предельного анализа даёт более стабильный результат. Аналогичные результаты, полученные методом конечных элементов, для некоторых исходных данных могут иметь неустойчивый характер.

Методология и методы исследований.

Для выполнения задач были применены следующие методы: экспериментальные методы, теоретические методы оценки предельной нагрузки (строгое решение теории предельного равновесия для однородных оснований, а так же приближенный метод расчёта несущей способности с использованием линий скольжения в форме логарифмической спирали), помимо этого были использованы численные методы, такие как метод предельного анализа, а также метод конечных элементов.

Личный вклад автора заключается в самостоятельном решении задачи о предельном давлении на двухслойные грунтовые основания и разработке прикладных программ для практических расчетов, в реализации численных расчётов как методом конечных элементов, так и методом предельного анализа, в постановке и проведении лабораторных исследований характера разрушения двухслойных оснований, а также в использовании полученных решений на строительных объектах.

Положения, выносимые на защиту.

1. Постановка и решение задачи о несущей способности двухслойного основания приближенным методом теории устойчивости грунтов.

2. Анализ результатов расчётов предельного давления фундамента мелкого заложения на двухслойные основания разработанным методом.

3. Результаты экспериментальных исследований предельного давления на основание, состоящее из двух слоев грунта, и характера зоны выпора при его разрушении.

4. Результаты сопоставительного анализа расчетов двухслойных оснований, полученных методами логарифмической спирали, методом предельного анализа, методом конечных элементов, а также экспериментальных данных.

Достоверность защищаемых положений обеспечивается комплексным подходом определения предельного давления на основание, состоящее из двух слоев грунта, с использованием решений статики сыпучей среды для однородных оснований и применением метода логарифмической спирали только для установления коэффициента влияния подстилающего слоя – относительной величины, изменяющейся в пределах глубины этого влияния от 0 до 1. Кроме того, достоверность результатов расчетов по предлагаемой методике подтверждается удовлетворительным соответствием численному моделированию и опытным данным, как лабораторных, так и натурных экспериментов.

Апробация работы. Полученные в диссертационном исследовании результаты излагались на XI Международной конференции «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, 2020), на II Всероссийской конференции с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий» (г. Пермь, 2021), на IV Международной научно-

технической конференции «Проектирование, строительство и эксплуатация мостов, тоннелей и метрополитенов» (г. Москва, 2023).

Внедрение результатов. Результаты, полученные в диссертационной работе, были использованы на реальных объектах ООО НИЦ «Бамтоннель», ООО ПИИ «БТП» и ООО «ГЕОФОНД+».

Публикации. Материалы, представленные в диссертации, изложены в 6 статьях, из которых 4 статьи изложены в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ. Помимо этого, имеется свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 165 страниц, в т.ч. 117 рисунков, 36 таблиц, 3 приложения. Список литературы содержит 141 источник, из которых 75 иностранных.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Согласно полученным научным результатам, диссертация соответствует п. 2, п. 5, п. 15, п. 16 паспорта специальности **2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения.**

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и общая характеристика диссертации.

Первая глава посвящена проблеме расчета несущей способности основания, состоящего из двух слоев. Внедрение новых технологий и конструкций в фундаментостроении требует совершенствования теоретической базы проектирования. Здесь, прежде всего, необходимо отметить работу головных институтов НИИОСП им. Н.М. Герсевича и ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, МГСУ-МИСИ, а также университетов СПбГАСУ-ЛИСИ, ПГУПС-ЛИИЖТ, АГТУ (Архангельск), ПГТУ (Пермь), ВолгГТУ (Волгоград), ЮрГПУ (Новочеркасск), КубГАУ (Краснодар), ТИУ (Тюмень), ДВГУПС (Хабаровск). И этот список, конечно, можно продолжить.

В области теоретического анализа геотехнических систем одним из сложных вопросов является расчет многослойных оснований, часто встречающихся в строительной практике. Основным методом оценки несущей способности грунтовых оснований являются решения статики сыпучей среды. Развитию теории предельного равновесия посвящены труды отечественных и зарубежных ученых – В.В. Соколовского, В.Г. Березанцева, В.А. Флорина, М.В. Малышева, А.С. Строганова, Ю.И. Соловьева, В.Г. Федоровского, А.Н. Богомоллова, В.П. Дыбы, Ю.А. Соболевского, Л.Р. Ставницера, А.К. Черникова, L. Prandtl, A. Naag и T.Karman, H. Reissner, W. Rankine, R.T. Shield, A. Balla, J. Biarez, A. Bishop, J. Brinch Hansen, A. Caquot и J. Kerisel, H. Hencky, R. Hill, F. Ketter, H. Lundgren и K. Mortensen, J. Mandel, G.G. Meyerhof и др. В практике проектирования фундаментов мелкого заложения с успехом используются статические решения теории предельного равновесия грунтов для однородных оснований. Для двухслойных оснований решения статики сыпучей среды получены не были.

Оценка устойчивости неоднородных грунтовых массивов, в частности двухслойных оснований выполняется исключительно приближенными методами.

Здесь следует отметить работы А.И. Вайнгольца и М.Ю. Дьякова, рассмотревших зависимость несущей способности двухслойных оснований от соотношения модулей деформации, несущего и подстилающего слоев на основе теории А.Н. Богомолова. Приведенная в справочнике проектировщика (1985 г.) приближенная методика расчета предельного давления дана только для вертикальной нагрузки и охватывает узкий диапазон значений исходных данных.

Анализу несущей способности двухслойного основания состоящего из верхнего слоя песка и слабого подстилающего слоя глины посвящен целый ряд работ зарубежных авторов с использованием расчетной схемы блоков. Эти решения можно разделить на две группы в зависимости от формы и комбинации блоков. В первой группе система блоков образует область выпора грунта (Yamaguchi), во второй рассматривается схема продавливания несущего слоя (Hanna и Meyerhof). В работе Mitsu Okamura, Jiro Takemura и Tsutomu Kimura говорится об ограничениях и недостатках данных методов при их сравнении с опытными данными и предлагается новый метод, в котором учитывается изменение бокового угла блока продавливания.

Следует отметить, что приближенные методы характеризуются разнообразием расчетных схем, как правило, предназначенных для решения конкретных случаев, и не отличаются достаточной универсальностью.

Конечноэлементное моделирование, как известно, позволяет учитывать разнообразные исходные данные задач и нашло применение для оценки несущей способности неоднородных оснований. Этому направлению посвящены работы А.К.Бугрова, А.Б. Фадеева, С.Б. Ухова, В.Н. Парамонова, А.К. Шашкина, Z. Szypcio и K. Dołżyk, A. Mosadegh и H. Nikraz, Pingping Rao, M. Georgiadis, A. M. Hanna, M. Huang, H-L. Qin, M. J. Kenny, K. Z. Andrawes, J.-H. Yin, Y.-J. Wang, Q. Zhang, M. Luan, M. Zhu, R. L. Michalowski. Величина предельного давления на основание при конечноэлементном моделировании устанавливается по конфигурации развития областей предельного напряженного состояния и характеру зависимости осадка–нагрузка. Этот вопрос в каждом конкретном случае решается индивидуально, и строгих критериев здесь нет. Поэтому контроль результатов численного моделирования аналитическими решениями представляется необходимым.

Экспериментальные исследования несущей способности двухслойных оснований, как в лабораторных, так и в полевых условиях преимущественно посвящены случаю слабого подстилающего слоя.

В нормативной литературе строгое решение статике сыпучей среды имеется только для расчёта несущей способности однородного основания, в то время, когда на практике чаще всего основание сложено различными слоями грунта.

В данной работе решено рассмотреть простую расчётную схему двухслойного грунтового основания. Для решения данной задачи поверхность скольжения принимается в виде логарифмической спирали. При этом нет необходимости конкретизировать функцию напряжений, действующих вдоль линии скольжения, поскольку реакции, обусловленные углом внутреннего трения, направлены к центру спирали. Предельная нагрузка находится из равенства моментов внутренних и внешних сил, действующих на выделенную область грунта относительно центра

логарифмической спирали. Помимо этого, линии скольжения в форме логарифмической спирали широко используются для приближенной оценки устойчивости грунтовых массивов, а также в строгом кинематическом методе теории предельного равновесия.

Задача рассматривается для условий плоской деформации как экстремальная с поиском положения линии скольжения, которой отвечает минимум предельной нагрузки.

Вторая глава посвящена аналитическому методу расчета несущей способности двухслойного основания. На рисунке 1 представлена расчетная схема метода логарифмической спирали для двухслойного основания, загруженного вертикальной центрально приложенной нагрузкой для условий плоской деформации. Расчетная схема однородного основания есть частный случай приведенной расчетной схемы.

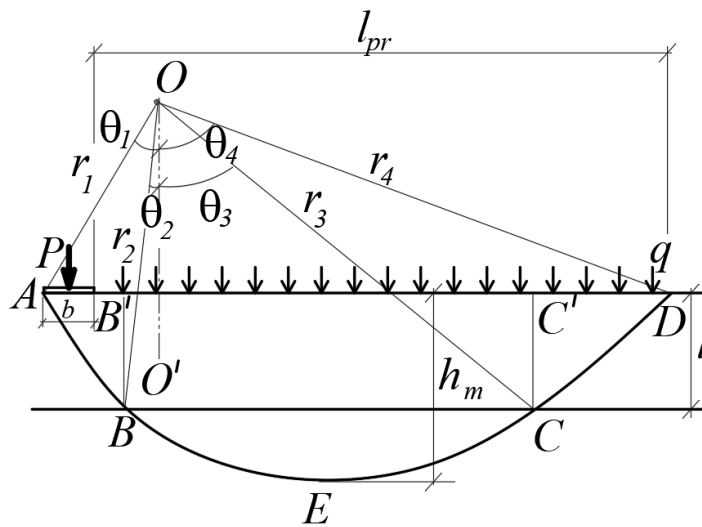


Рисунок 1 – Расчетная схема метода логарифмической спирали для двухслойного основания.

Линия скольжения, пересекающая слои грунта в точках В и С, состоит из трех отрезков логарифмических спиралей, имеющих общий центр О и определяемых уравнениями –

$$\begin{aligned} \text{Участок } AB \ (\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2): r &= r_1 e^{(\theta - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi_1} \\ \text{Участок } BC \ (\theta_2 \leq \theta \leq \theta_3): r &= r_2 e^{(\theta - \theta_2) \operatorname{tg} \varphi_2} \\ \text{Участок } CD \ (\theta_3 \leq \theta \leq \theta_4): r &= r_3 e^{(\theta - \theta_3) \operatorname{tg} \varphi_1} \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь угол θ отсчитывается от вертикали OO' в положительном направлении против часовой стрелки. Радиусы r_2, r_3, r_4 и углы $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ определяются из геометрии схемы. Исходными параметрами этой схемы являются угол θ_1 и радиус r_1 .

Частное значение силы предельного давления P , соответствующее произвольной схеме выпора, определяется из уравнения равновесия моментов относительно центра логарифмических спиралей:

$$P = -2 \frac{M_\gamma + M_c + M_q}{2r_1 \sin \theta_1 + b} \quad (2)$$

Моменты от действия собственного веса грунта M_γ , удельного сцепления M_c и пригрузки M_q даются выражениями:

$$\begin{aligned}
M_\gamma = & \frac{\gamma_1 r_1^3}{4} \{ e^{3(\theta_2 - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi_1} \cdot F(\theta_2, \varphi_1) - F(\theta_1, \varphi_1) + \\
& + 2 \cos \theta_1 [\sin^2 \theta_1 - e^{2(\theta_2 - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi_1} \cdot \sin^2 \theta_2] \} + \\
& \frac{\gamma_2 r_2^3}{4} \{ e^{3(\theta_3 - \theta_2) \operatorname{tg} \varphi_2} \cdot F(\theta_3, \varphi_2) - F(\theta_2, \varphi_2) + \\
& + 2 \cos \theta_2 [\sin^2 \theta_2 - e^{2(\theta_3 - \theta_2) \operatorname{tg} \varphi_2} \cdot \sin^2 \theta_3] \} + \\
& + \frac{\gamma_1 r_1^3}{4} \{ e^{3(\theta_4 - \theta_3) \operatorname{tg} \varphi_1} \cdot F(\theta_4, \varphi_1) - F(\theta_3, \varphi_1) + \\
& + 2 \cos \theta_3 \frac{r_1}{r_3} [\sin^2 \theta_3 - e^{2(\theta_4 - \theta_3) \operatorname{tg} \varphi_1} \cdot \sin^2 \theta_3] \} + \\
& + \frac{\gamma_1 l}{2} (r_3^2 \sin^2 \theta_3 - r_2^2 \sin^2 \theta_2)
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
M_c = & \frac{c_1 r_1^2}{2 \operatorname{tg} \varphi_1} [e^{2(\theta_2 - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi_1} - 1] + \frac{c_2 r_2^2}{2 \operatorname{tg} \varphi_2} [e^{2(\theta_3 - \theta_2) \operatorname{tg} \varphi_2} - 1] + \\
& + \frac{c_1 r_3^2}{2 \operatorname{tg} \varphi_1} [e^{2(\theta_4 - \theta_3) \operatorname{tg} \varphi_1} - 1] \\
M_q = & \frac{q}{2} [r_4^2 \sin^2 \theta_4 - (r_1 \sin \theta_1 + b)^2]
\end{aligned}$$

где

$$F(\theta_i, \varphi_i) = \frac{\cos \theta_i - 2 \cos(2\varphi_i + \theta_i)}{1 + 8 \sin^2 \varphi_i} - \frac{\cos 3 \theta_i}{3}$$

Минимум функции $P(r_1, \theta_1)$ рассматривается как несущая способность основания или предельное давление на основание $P_{us} = \min P(r_1, \theta_1)$.

Длина зоны выпора l_{pr} и ее максимальная глубина h_m равны:

$$l_{pr} = r_4 \sin \theta_4 - r_1 \sin \theta_1 - b \quad h_m = r_2 e^{(\varphi_2 - \theta_2) \operatorname{tg} \varphi_2} \cos \varphi_2 - r_1 \cos \theta_1 \tag{4}$$

В случае слабого подстилающего слоя возможно наличие двух локальных минимумов функции $P_{us} = \min P(r_1, \theta_1)$, из которых для оценки предельного давления принимается меньшее значение. Данный эффект иллюстрируется на рис.2 для двухслойного основания с характеристиками: $\gamma_1 = 20 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$, $c_1 = 12 \text{ кПа}$, $\varphi_1 = 30^\circ$ (несущий слой) и $\gamma_2 = 18 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$, $c_2 = 24 \text{ кПа}$, $\varphi_2 = 15^\circ$ (подстилающий слой) при ширине штампа $b=1\text{ м}$, пригрузке $q=10 \text{ кН/м}$ и глубины расположения кровли подстилающего слоя 1,7 м. На рис.3 дан график зависимости значения критической силы, от принятой глубины зоны выпора.

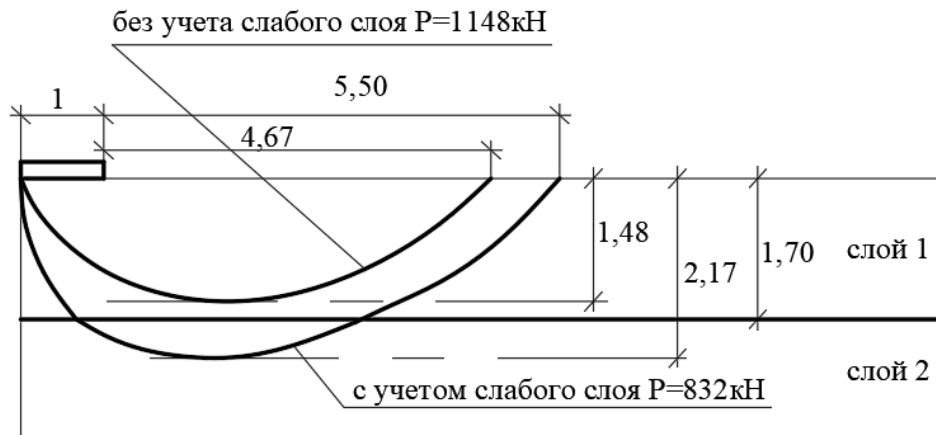


Рисунок 2 – Линии скольжения разрушения основания.

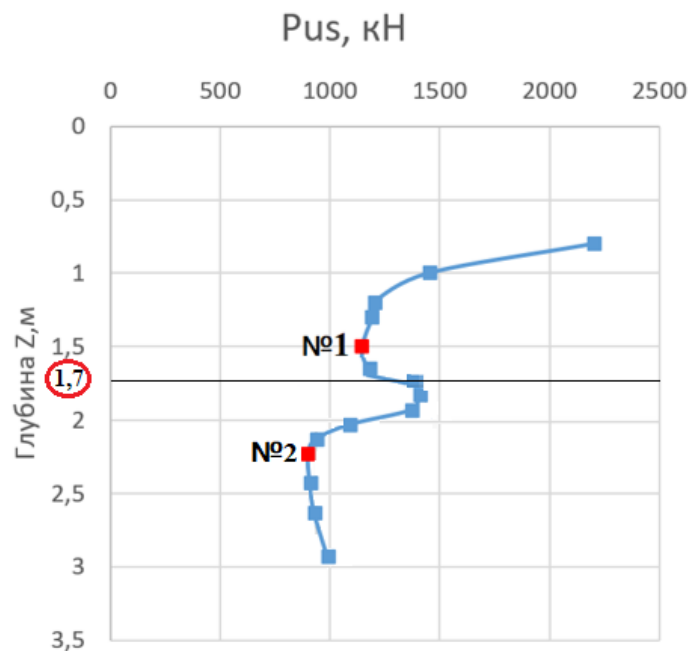


Рисунок 3 – График зависимости значения критической силы, от принятой глубины зоны выпора.

При определенной глубине заложения, слабый подстилающий слой перестаёт влиять на несущую способность основания.

Для практических расчетов был разработан специальный алгоритм и соответствующая программа для поиска положения экстремальной линии скольжения, по которой произойдёт разрушение основания. Экранное изображение данной программы показано на рисунке 4 (блок-схема программы представлена в тексте диссертации).

Расчет несущей способности двухслойного основания ленточного фундамента

Исходные данные

$b = 1$ м. - ширина штампа (фундамента)
 $q = 10$ кН/м. - боковая пригрузка

Характеристики несущего слоя грунта

$\gamma_1 = 20$ кН/м³ - удельный вес грунта
 $c_1 = 12$ кПа. - удельное сцепление грунта
 $\phi_1 = 30$ ° (град.) - угол внутреннего трения
 $L = 1.7$ м. - мощность несущего слоя

Характеристики подстилающего слоя грунта

$\gamma_2 = 18$ кН/м³ - удельный вес грунта
 $c_2 = 24$ кПа. - удельное сцепление грунта
 $\phi_2 = 15$ ° (град.) - угол внутреннего трения

Рассчитать

Результат
 Параметры линии скольжения:

Линия скольжения проходит в несущем слое

$r_1 =$ м. $\theta_1 =$ ° (град.)
 $r_2 =$ м. $\theta_2 =$ ° (град.)

Линия скольжения пересекает границу слоев

$r_1 = 1.689$ м. $\theta_1 = -62$ ° (град.)
 $r_2 = 2.625$ м. $\theta_2 = -18.244$ ° (град.)
 $r_3 = 3.529$ м. $\theta_3 = 45.06$ ° (град.)
 $r_4 = 5.069$ м. $\theta_4 = 81.001$ ° (град.)

$L_{pr} = 5.498$ м. - длина зоны выпора
 $H_m = 2.169$ м. - максимальная глубина зоны выпора
 $P_{us} = 832.05$ кН. - предельная нагрузка

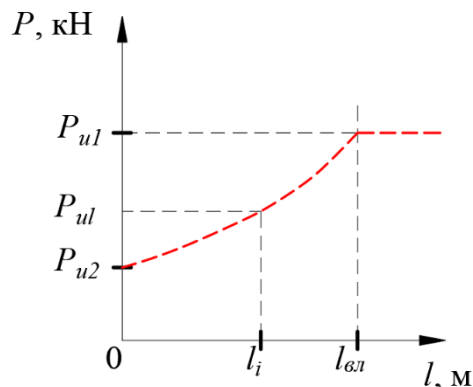
Схема разрушения основания

*Для увеличения изображения - двойной щелчок
 *Для уменьшения изображения - 1 щелчок

Рисунок 4 – Общий вид программы.

Сопоставление результатов расчета несущей способности однородного основания методом логарифмической спирали с решениями статики сыпучей среды показало наличие систематической ошибки в сторону завышения, которая имеет место для метода логарифмической спирали. Для нейтрализации этой ошибки в случае двухслойного основания было решено ввести специальный коэффициент влияния подстилающего слоя на величину предельного давления.

Очевидно, что несущая способность двухслойного основания будет варьироваться в пределах от P_{u2} (для подстилающего слоя) до P_{u1} (для несущего слоя) в зависимости от глубины положения кровли подстилающего слоя. При определенной глубине слабый слой перестанет влиять на несущую способность P_{u1} . Это параметр назовем глубиной влияния слабого подстилающего слоя $l_{вл}$. Характерный график зависимости несущей способности основания P_{ul} от глубины заложения подстилающего слоя l_i показан на рис.5.

Рисунок 5 – График зависимости несущей способности основания P_{ul} от глубины заложения подстилающего слоя l_i .

Отсюда получаем формулу для определения несущей способности двухслойного основания при глубине заложения l_i в пределах от 0 до $l_{\text{вл}}$:

$$P_{ul} = P_{u2} + k_l(P_{u1} - P_{u2}), \quad (5)$$

где k_l – коэффициента влияния подстилающего слоя, изменяющийся от 0 до 1 в зависимости от l_i .

Для определения несущей способности двухслойного основания необходимо определить $l_{\text{вл}}$ и зависимость k_l от l_i . Величину k_l определим из формулы (5), подставив туда значения P_{us1} , P_{us2} и P_{usl} , определенные методом логарифмической спирали:

$$k_l = \frac{P_{usl} - P_{us2}}{P_{us1} - P_{us2}} \quad (6)$$

Для основания, состоящего из двух слоев грунта, представленного на рисунке 6, показан рассчитанный график зависимости коэффициента k_l от l_i :

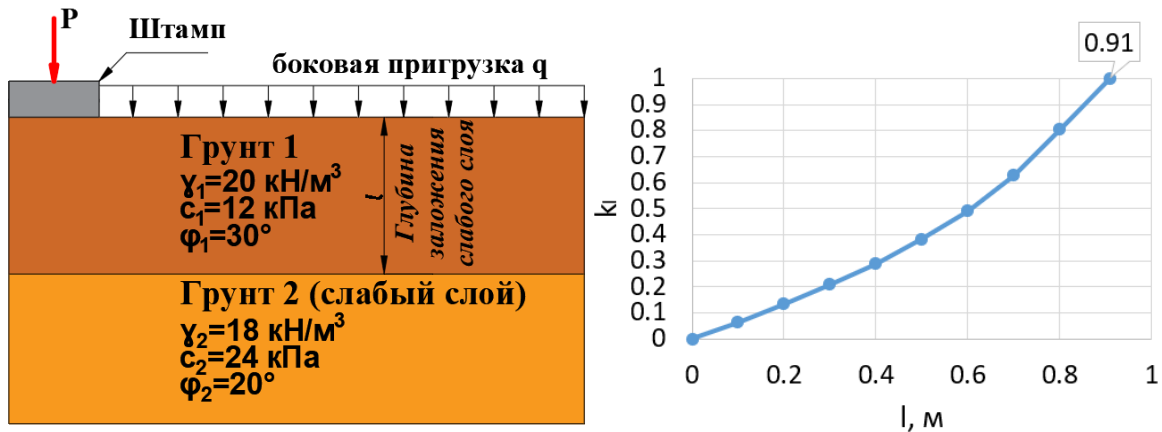


Рисунок 6 – График зависимости коэффициента влияния слабого подстилающего слоя k_l от l_i .

Далее, меняя значение ϕ_2 с шагом 5° , были выполнены расчёты и получены графики зависимости коэффициента k_l от глубины заложения подстилающего слоя при различных значениях угла внутреннего трения подстилающего слоя ϕ_2 (рисунок 7а). Так же, меняя значение c_2 , были получены графики зависимости коэффициента влияния k_l от глубины заложения подстилающего слоя при различных значениях удельного сцепления подстилающего слоя c_2 (рисунок 7б).

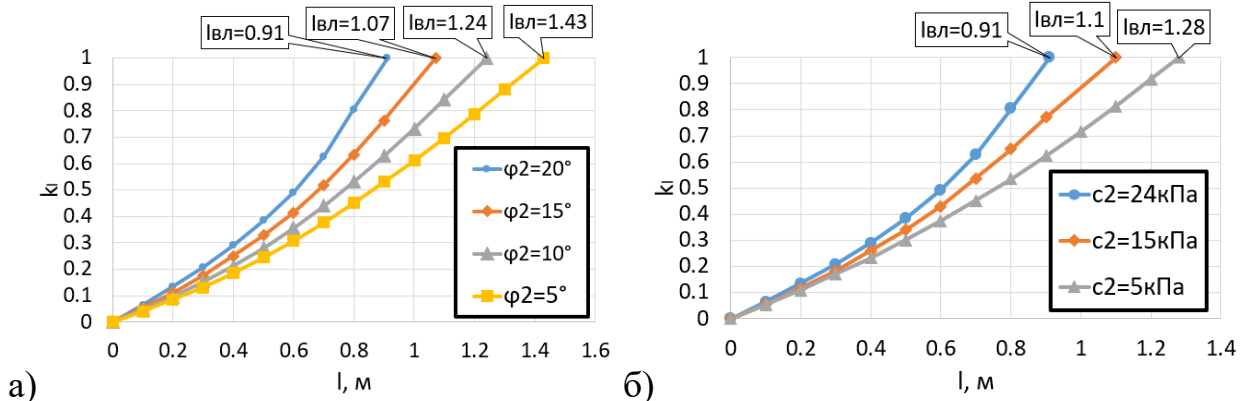


Рисунок 7 – График зависимости коэффициента влияния k_l от глубины заложения подстилающего слоя при различных значениях: а - угла внутреннего трения ϕ_2 , б - удельного сцепления c_2 .

Графики, изображенные на рисунке 7, показывают, что чем меньше значения прочностных характеристик подстилающего слоя грунта (φ_2 , c_2), тем выше график зависимости коэффициента влияния подстилающего слоя k_l от глубины заложения подстилающего слоя. Это обусловлено тем, что чем слабее подстилающий слой, тем больше глубина его влияния $l_{вл}$.

Таким образом, по СП 22.13330.2016 рассчитывается несущая способность однородного основания для грунта-1 и грунта-2, по формуле (6) устанавливается коэффициент влияния k_l и по формуле (5) определяется несущая способность двухслойного основания.

Предлагаемый метод определения предельной нагрузки на основание, состоящее из двух слоев грунта, применим к любой комбинации прочностных характеристик двух слоёв, а также соответствует решениям статики сыпучей среды для однородных оснований.

В третьей главе приведено моделирование процесса разрушения двухслойного основания при помощи численных методов и сопоставление с разработанным аналитическим решением. Было рассмотрено 3 варианта комбинации грунтов в непригруженном основании (подстилающий слой слабый) для штампа шириной 1 м. (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики грунтов для трёх вариантов расчёта А, В, С

Расположение	Хар-ки	Варианты		
		А	В	С
Грунт 1 - несущий слой	γ_1 , кН/м ³	17	17	21
	φ_1°	32	32	15
	c_1 , кПа	1	1	18
Грунт 2 - подстилающий слой	γ_2 , кН/м ³	16	22	22
	φ_2°	29,5	10	10
	c_2 , кПа	1	9	9

Расчеты выполнялись для различных глубин заложения слабого подстилающего слоя разработанным аналитическим методом и численным методом по программе Optum G2, в которой реализован метод предельных состояний.

Так же приведены расчёты из статьи Szypcio, Z. и Dołżyk, K., выполненные методом конечных элементов в программе Plaxis для этого же примера. Сопоставления значений несущей способности, полученных разными методами, представлены в виде графиков на рисунке 8 (а, б, в).

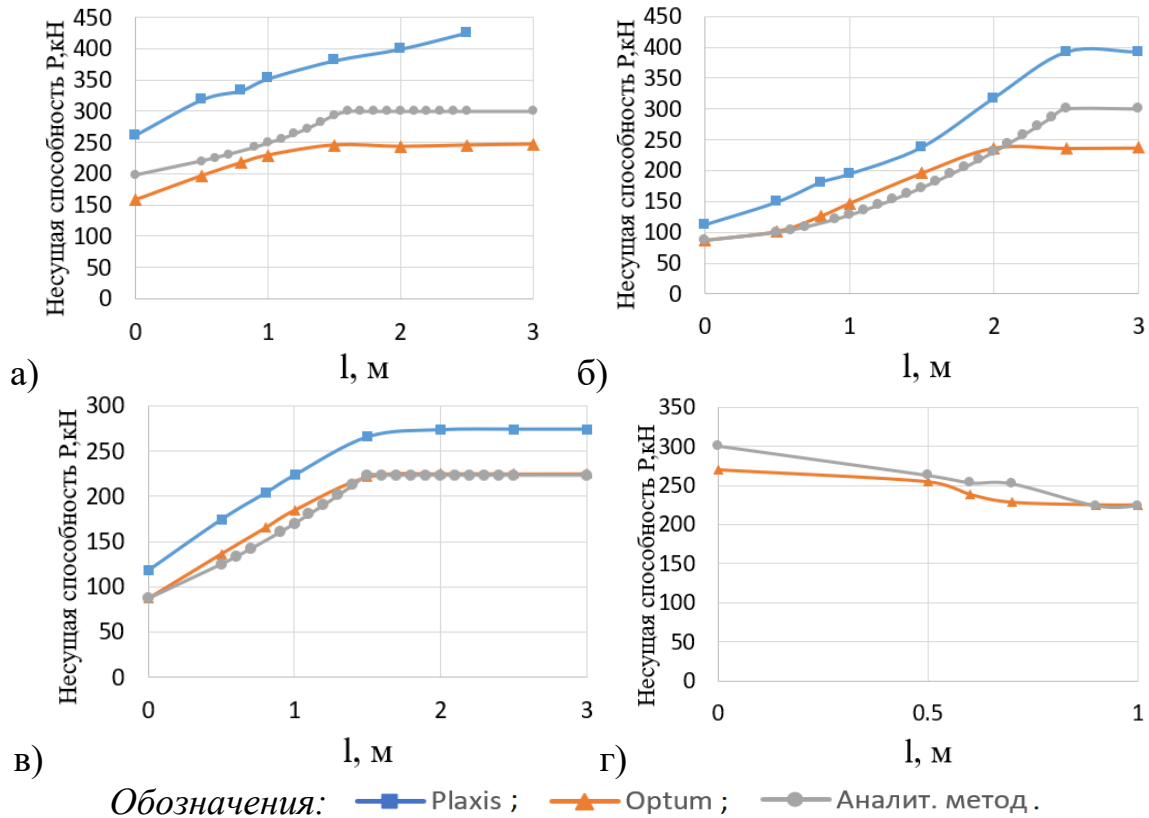


Рисунок 8 – График зависимости несущей способности от глубины заложения подстилающего слоя (l): а - вариант А; б - вариант В; в - вариант С; г - прочный подстилающий слой.

Также был выполнен расчёт разработанным аналитическим методом и численным методом в программе Optum G2 двухслойного основания с прочным подстилающим слоем ($\gamma_1 = 21 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$, $c_1 = 18 \text{ кПа}$, $\varphi_1 = 15^\circ$; $\gamma_2 = 17 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$, $c_2 = 1 \text{ кПа}$, $\varphi_2 = 32^\circ$). Сопоставление значений несущей способности, полученных разными методами, представлено в виде графиков на рисунке 8(г).

Приведенные графики показывают, что для всех вариантов величина глубины влияния подстилающего слоя (как прочного, так и слабого), рассчитанная аналитическим методом хорошо коррелирует с численными методами. Кроме того, распределение несущей способности по глубине заложения подстилающего слоя, полученное при помощи аналитического метода, близко к распределениям, полученным численными методами. Однако численные методы в отличие от аналитического далеко не всегда дают точное значение предельной нагрузки однородных оснований, по сравнению с существующим строгим решением.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям и сопоставительному анализу. Лабораторная установка для проведения исследований состоит из лотка размерами 300x400x50 мм, штампа размерами 50x50 мм, металлической штанги с рамой и прогибомера с грузиком (рис.9).

Сначала в лоток с послойным уплотнением укладывался суглинок (грунт 2). Затем, поверх суглинка, также с послойным уплотнением укладывался песок (грунт 1). Для отслеживания формы деформации основания, т.е. для фиксации ожидаемой зоны выпора, с определенным шагом по вертикали укладывался цветной песок. Характеристики грунтов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики грунтов

Расположение	Характеристики	
Грунт 1 – прочный несущий слой (песок)	γ_1 , кН/м ³	17
	φ_1°	32
	c_1 , кПа	1
Грунт 2 – слабый подстилающий слой (суглинок)	γ_2 , кН/м ³	19
	φ_2°	7
	c_2 , кПа	23

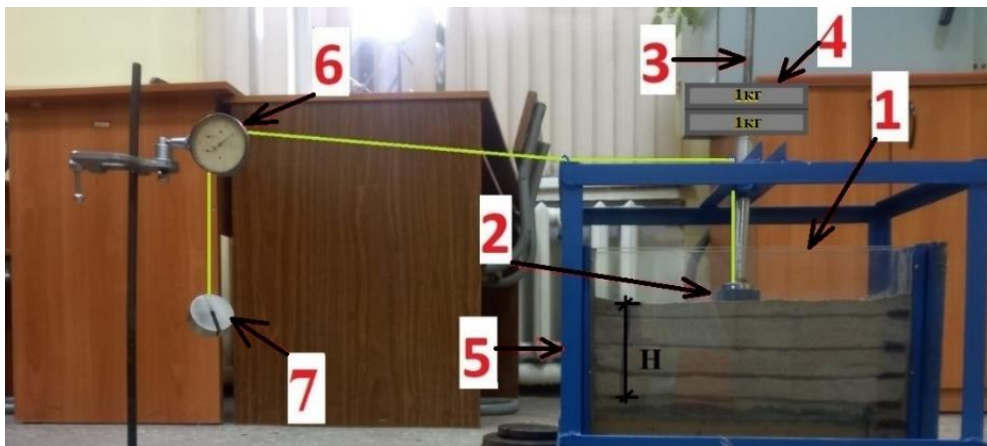


Рисунок 9 – Лабораторная установка для определения несущей способности двухслойного основания при разной глубине заложения подстилающего слоя (1 – лоток, 2 – штамп, 3 – штанга, 4 – блины(показаны условно), 5 – рама, 6 – прогибомер, 7 – грузик).

Результаты испытания №3 показаны на рисунке 10.

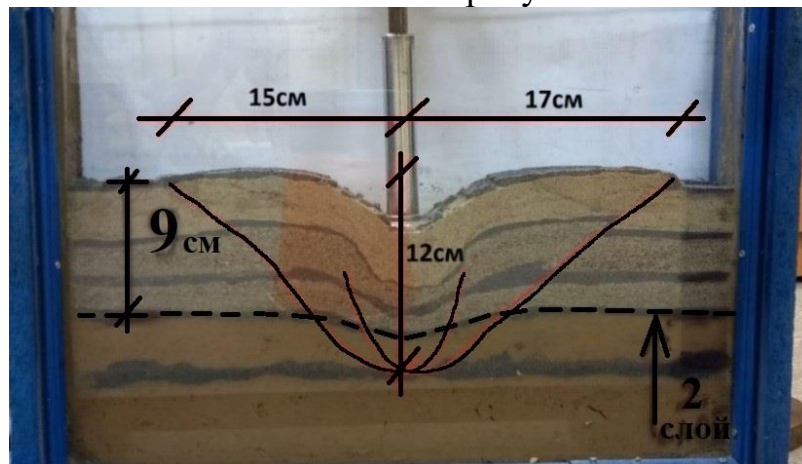


Рисунок 10 – Испытание №3 ($H=9$ см, $H/B=1,8$) – после потери несущей способности основания.

По полученным значениям перемещений от нагрузки построен график зависимости осадка-нагрузка для разной глубины заложения слабого подстилающего слоя (рисунок 11а).

На рисунке 11б представлен сопоставительный график изменения опытных и теоретических значений коэффициента влияния от относительной глубины заложения кровли подстилающего слоя.

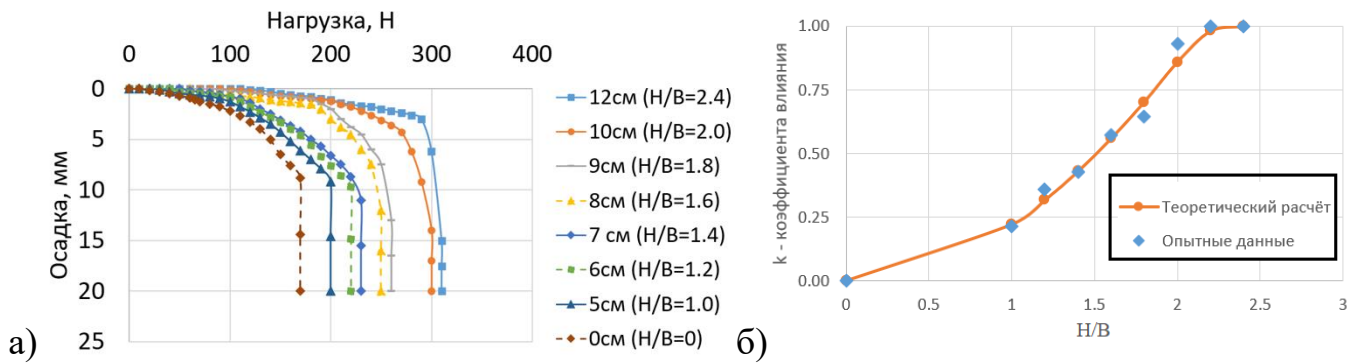


Рисунок 11 – График зависимости: а - осадки основания от нагрузки; б - коэффициента влияния от относительной глубины заложения слабого подстилающего слоя.

Сводный результат значений несущей способности основания, состоящего из двух слоев грунта, приведён в таблице 3.

Таблица 3 – Значения несущей способности основания, состоящего из двух слоев грунта, при разной глубине залегания слабого подстилающего слоя

H/B	2,4	2	1,8	1,6	1,4	1,2	1	0
P_u, H	310	300	260	250	230	220	200	170

По имеющимся значениям несущей способности, приведенным в таблице 3 определялись опытные значения коэффициента влияния.

Значения несущей способности были получены прямыми измерениями (количество блинов весом 1 кг, при котором двухслойное основания теряет несущую способность). Приборная погрешность составляла 1 кг, а общая погрешность при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ была $\pm 18H$. Грубые ошибки исключались в предположении нормального распределения случайных погрешностей. Поскольку мы получаем значение коэффициента влияния косвенно по формуле (6), то зная абсолютные погрешности входящих в неё величин (p_1, p_2, p_l), значение абсолютной погрешности для k_l составило $\pm 0,15$.

Из графика (рисунок 11б) следует, что разработанный теоретический метод достаточно приближен к результатам, полученным опытным путём, максимальная разница равна 11%. Кроме того, опыты подтвердили существование глубины влияния подстилающего слоя, а также прохождение линии скольжения через два слоя при глубине залегания подстилающего слоя меньшей, чем глубина влияния.

Далее было выполнено сопоставление результатов испытаний в центрифуге, представленными в работе М. Okamura, J. Takemura и Т. Kimura, с разработанным аналитическим методом. Как известно, эффект собственного веса, аналогичный эффекту крупномасштабного фундамента, моделируется в масштабе $1/n$ модели фундамента, подвергнутой центробежному ускорению, в n раз превышающему гравитацию земли.

Для прототипов фундаментов при $H/B = 1; 2; 3$ разработанный аналитический метод дал значения несущей способности на 22 – 36% меньше (в запас), чем значения, полученные в центрифуге опытным путём. Так же значение глубины влияния слабого подстилающего слоя, полученное в центрифуге, равно значению, полученному разработанным аналитическим методом.

Также было выполнено сопоставление полевых испытаний с разработанным аналитическим методом. Крупномасштабные полевые испытания были проведены на природных глинистых отложениях, поверх которых был отсыпан и уплотнен зернистый грунт. Разработанный аналитический метод дал значения несущей способности на 6 – 11% меньше (в запас), чем значения, полученные на полевых испытаниях, что является приемлемым результатом, для использования данного метода в реальных двухслойных основаниях.

В пятой главе даны практические рекомендации по определению предельной нагрузки на основание, состоящее из двух слоев грунта. Для практических целей помимо возможности определять несущую способность двухслойного основания с любой комбинацией прочностных характеристик, необходимо иметь возможность определять несущую способность такого основания при наличии у предельной нагрузки угла наклона и эксцентриситета.

В соответствии со схемой на рис.12 равнодействующая предельной нагрузки P_u наклонена к вертикали на угол δ_a и имеет эксцентриситет e . Соответственно, эти параметры учитываются при определении момента силы P_u относительно центра логарифмической спирали и приводят к выражению:

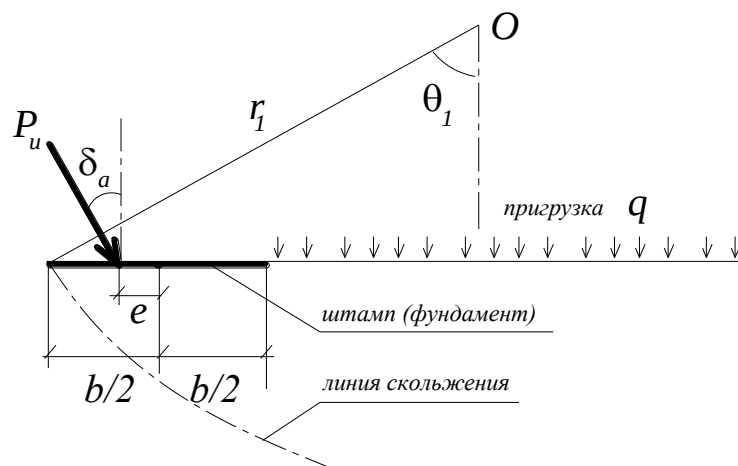


Рисунок 12 – Эксцентриситет и угол приложения предельной нагрузки.

$$P = P(r_1, \theta_1) = 2 \cdot \frac{M_\gamma + M_c + M_q}{2r_1 \sin(\delta_a - \theta_1) + (2e - b) \cdot \cos \delta_a} \quad (7)$$

Моменты от действия собственного веса грунта M_γ , удельного сцепления M_c и пригрузки M_q , как и для случая вертикальной нагрузки, определяются формулами (3).

Несущая способность основания есть минимум данной функции $P(r_1, \theta_1)$. Для предельной нагрузки P_{ul} используется формула (5).

В программу, описанную во второй главе, была добавлена возможность указать как угол наклона, так и эксцентриситет предельной нагрузки (рис. 13). Также программа сразу рассчитывает и выводит коэффициент влияния подстилающего слоя для заданных исходных данных (рис. 14).

Расчет несущей способности двухслойного основания ленточного фундамента

Исходные данные			
$b = 1$ м.	- ширина штампа (фундамента)	$\delta a = 15$ ° (град.)	- угол наклона предельной нагрузки к вертикали
$q = 20$ кН/м.	- боковая пригрузка	$e = 0.1$ м.	- эксцентриситет предельной нагрузки
Характеристики несущего слоя грунта		Характеристики подстилающего слоя грунта	
$\gamma_1 = 20$ кН/м ³	- удельный вес грунта	$\gamma_2 = 18$ кН/м ³	- удельный вес грунта
$c_1 = 12$ кПа.	- удельное сцепление грунта	$c_2 = 24$ кПа.	- удельное сцепление грунта
$\phi_1 = 30$ ° (град.)	- угол внутреннего трения	$\phi_2 = 20$ ° (град.)	- угол внутреннего трения
$L = 0.8$ м.	- мощность несущего слоя		

Рисунок 13 – Исходные данные программы.

Результат			
Параметры линии скольжения:			
<i>Линия скольжения проходит в несущем слое</i>		<i>Линия скольжения пересекает границу слоев</i>	
$r_1 =$ м.	$\theta_1 =$ ° (град.)	$r_1 = 1.11$ м.	$\theta_1 = -40$ ° (град.)
$r_2 =$ м.	$\theta_2 =$ ° (град.)	$r_2 = 1.651$ м.	$\theta_2 = -0.648$ ° (град.)
		$r_3 = 2.123$ м.	$\theta_3 = 38.974$ ° (град.)
		$r_4 = 3.009$ м.	$\theta_4 = 73.58$ ° (град.)
$L_{pr} = 2.6$ м.		- длина зоны выпора	
$H_m = 0.918$ м.		- максимальная глубина зоны выпора	
$P_{us} = 472.474$ кН.		- предельная нагрузка	
$k_l = 0.73$		- коэффициент влияния подстилающего слоя	

Рисунок 14 – Результаты расчёта программы.

Таким образом, порядок расчёта предельной нагрузки на двухслойное основание при помощи программы заключается в следующем:

1. Ввод исходных данных (ширина фундамента, боковая пригрузка, угол наклона и эксцентриситет предельной нагрузки, характеристики грунтов);
2. Расчет несущей способности однородных оснований P_{u1} и P_{u2} по формулам СП 22.13330.2016;
3. Определение искомой предельной нагрузки P_{ul} по формуле (5), в которую подставляем коэффициент влияния подстилающего слоя k_l , полученный в программе.

Далее, в главе представлено сопоставление проверки прочности слабого подстилающего слоя по его расчётному сопротивлению с расчетом предельной нагрузки на основание, состоящее из двух слоев грунта. В результате было установлено, что несущая способность двухслойного основания существенно превышает максимальную нагрузку, соответствующую пределу прочности слабого слоя по его расчетному сопротивлению.

Что касается зарубежных норм, в Еврокоде 7 сказано, что следующее неравенство должно выполняться для всех предельных состояний:

$$V_d < R_d, \quad (8)$$

где V_d – проектное загружение, R_d – несущая способность основания.

R_d вычисляется с помощью коэффициентов, которые применяются к характеристикам грунта и к самой несущей способности R (данные коэффициенты приводятся в приложении Еврокода 7):

$$\begin{aligned} R_d &= R\{\gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d\}, \\ R_d &= R\{\gamma_F F_{rep}; X_k; a_d\} / \gamma_R. \end{aligned} \quad (9)$$

Для определения R_d для двухслойного основания вместо R в этих формулах предлагается использовать значение несущей способности двухслойного основания, полученное при помощи разработанного аналитического метода.

В конце главы показано применение разработанной методики для **анализа реальных ситуаций**.

С помощью разработанного аналитического метода был проведен анализ аварийной ситуации, заключающейся в потере несущей способности основания понтонов, на которые опиралась самоподъемная платформа с буровой установкой (КНР) (рисунок 15).

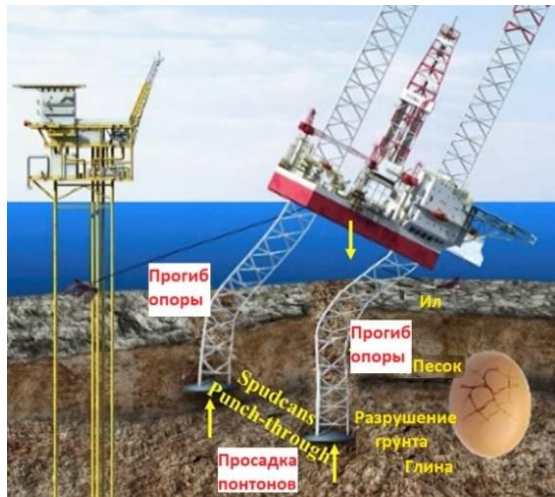


Рисунок 15 – Схематичное изображение аварии с потерей несущей способности двухслойного основания.

Основанием понтонов диаметром 17,98 м служил водонасыщенный 3-х метровый слой песка ($\gamma_1=9,4$ кН/м³, $\varphi_1 = 25^\circ$), подстилаемый слабой глиной ($\gamma_2=8,8$ кН/м³, $c_2=37$ кПа, $\varphi_2 = 0^\circ$). Фактическая (проектная) нагрузка под подошвой понтонов составляла 100 МН. Во избежание повтора данной аварии из-за потери несущей способности двухслойного основания, была осуществлена замена существующих понтонов, на понтоны диаметром 23,00 м.

Определенная несущая способность двухслойного основания по формуле (5) для понтонов диаметром 17,98 м составила:

$$P_{ul} = 78,38 \text{ МН} + 0,015(134,5 \text{ МН} - 78,38 \text{ МН}) = 79,23 \text{ МН.}$$

а для диаметра 23 м была равна:

$$P_{ul} = 127,17 \text{ МН} + 0,01(218,23 \text{ МН} - 127,17 \text{ МН}) = 128,08 \text{ МН.}$$

Значение несущей способности двухслойного основания в данном случае больше проектной нагрузки ($128,08 \text{ МН} > 100 \text{ МН}$), что обеспечивает безопасность конструкции. Аналитический метод показал, что действительно данное двухслойное основание не могло выдержать проектную нагрузку без увеличения диаметра понтона.

Другая аварийная ситуация заключалась в перегрузке двухслойного основания столбчатого фундамента при реконструкции гостиницы в г. Ялutorовск (рисунок 16).

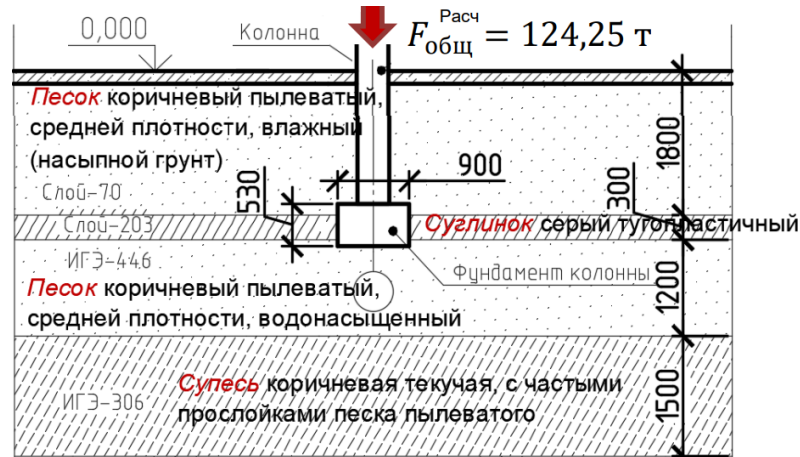


Рисунок 16 – Геологический разрез.

Фундамент 900х900 мм опирался на песок ($\gamma_1 = 19,2 \text{ кН/м}^3$, $\varphi_1 = 25^\circ$, $c_1 = 1 \text{ кПа}$), подстилаемый слабой текучей супесью ($\gamma_2 = 19,4 \text{ кН/м}^3$, $\varphi_2 = 15^\circ$, $c_2 = 8 \text{ кПа}$). Здесь расчетная нагрузка на основание была равна 1242 кН.

Несущая способность основания, вычисленная по формуле (5) с учетом коэффициента формы, составила:

$$P_{ul} = 440,79 + 0,593(978,85 - 440,79) = 759,86 \text{ кН (77,46 т)};$$

Здесь расчётная нагрузка на фундамент превышает значение несущей способности в 1,6 раз. Из-за того, что на момент обследования здание не эксплуатировалось, фактические нагрузки соответствовали ~75% от проектных и превышение несущей способности составляло 25%. Основание не разрушилось только благодаря тому, что выпор грунта сдержало армированное перекрытие пола первого этажа, которое покрылось трещинами от деформации. В данном случае необходимо срочное усиление основания.

Таким образом, оценка несущей способности основания с учетом подстилающего слоя позволяет исключить возможность его разрушения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены новые решения задачи о несущей способности двухслойного основания в рамках метода логарифмической спирали для любых сочетаний характеристик грунтов несущего и подстилающего слоев. Введен новый относительный параметр – коэффициент влияния подстилающего слоя, показывающий степень изменения несущей способности в зависимости от глубины его залегания.

2. Предложено понятие глубины влияния как максимальной глубины залегания подстилающего слоя, при превышении которой подстилающий слой можно не учитывать в расчете несущей способности. Установлена зависимость величины глубины влияния слабого подстилающего слоя от его характеристик. В зависимости от характеристик грунтов глубина влияния варьировалась в пределах от $1,5B$ до $2,5B$, где B – ширина фундамента.

3. Разработан новый аналитический метод определения предельного давления на основание, состоящее из двух слоев грунта, на основании полученных решений (с использованием коэффициента влияния подстилающего слоя) и решений статики сыпучей среды для однородного основания.

4. Выявлен ряд особенностей формирования областей разрушения двухслойного основания в плоском грунтовом лотке для вертикальной нагрузки. Установлено, что зона выпора захватывает оба слоя при глубине залегания подстилающего слоя в пределах зоны выпора в однородном грунте несущего слоя. В случае слабого подстилающего слоя зона выпора захватывает этот слой при его расположении в пределах глубины влияния.

5. Исследован характер формирования области разрушения двухслойного основания и величины несущей способности в рамках численного моделирования методом конечных элементов и методом предельного анализа. Сопоставлением с предложенными решениями установлено, что метод конечных элементов показал завышение несущей способности на 25...40%, а метод предельного анализа показал сходимость в пределах 5...15%. Глубина влияния подстилающего слоя при численном моделировании и в аналитическом решении практически совпадают. Таким образом, показана корректность применения метода предельного анализа к решению данного класса задач при его верификации разработанным аналитическим методом.

6. Сопоставление результатов аналитического решения с известными данными других авторов (полевых опытов и центробежного моделирования) показали удовлетворительное соответствие – 6...11% (полевые опыты), 22...36% (центробежное моделирование). Указанные расхождения имеют место в сторону уменьшения предельной нагрузки при аналитическом расчете, что позволяет использовать разработанный аналитический метод для практических расчетов при проектировании фундаментов на двухслойных основаниях.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования: создание метода расчета несущей способности многослойных оснований, а также оснований, сложенных консолидирующимися грунтами.

СПИСОК СТАТЕЙ АВТОРА, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. Караулов А.М., Королев К.В., Шохирев М.В. Оценка несущей способности двухслойных грунтовых оснований. / Известия вузов. Строительство. 2020. № 11. С. 18-27.
2. Шохирев М.В., Караулов А.М., Королев К.В. Расчет несущей способности двухслойного грунтового основания для наклонной нагрузки. / Основания, фундаменты и механика грунтов. 2023. № 6. С. 2-6.
3. Шохирев М.В. К методике расчета несущей способности двухслойных оснований. / Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3. С. 57-66.
4. Шохирев М.В. Экспериментальные исследования несущей способности двухслойного основания. / Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1. С. 93-102.

Научные труды и научные публикации в других изданиях:

5. Шохирев М.В. Анализ несущей способности основания со слабым подстилающим слоем. / Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2021. № 1. С. 135-140.
6. Шохирев М.В. Метод определения несущей способности двухслойного основания. / Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий. Материалы II Всероссийской конференции с международным участием. Изд-во: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. 2021. С. 117-131.

Патенты на изобретения, патенты (свидетельства) на полезную модель, патенты на промышленный образец, свидетельства на программу для ЭВМ, базы данных:

7. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021614099, 18.03.2021. Заявка № 2021613050 от 09.03.2021. Расчет несущей способности двухслойного основания ленточного фундамента / М.В. Шохирев – Оpubл. 18.03.2021.