

На правах рукописи



ВАНИНА ЮЛИЯ ВИКТОРОВНА

**ОСАДКА И НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОСНОВАНИЙ ФУНДАМЕНТОВ
ВБЛИЗИ БОРТОВ КОТЛОВАНОВ**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва-2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ).

Научный руководитель: доктор технических наук
Тер-Мартirosян Армен Заверович

Официальные оппоненты: **Королев Константин Валерьевич**
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», кафедра «Геотехника, тоннели и метрополитены», заведующий кафедрой

Королева Ирина Владимировна
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра «Основания, фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология», доцент

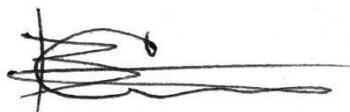
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет"

Защита состоится «29» ноября 2023 г. в 12:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.05 (Д 212.138.14), созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ) по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, зал Ученого Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИУ МГСУ и на сайте <http://www.mgsu.ru>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сидоров
Виталий Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. В условиях плотной городской застройки при строительстве открытым способом подземной транспортной инфраструктуры, а также подземных частей зданий и сооружений, в том числе уникальных и высотных, важнейшей задачей проектирования является обеспечение сохранности и возможности дальнейшей эксплуатации объектов, находящихся в зоне влияния нового строительства. На сегодняшний день осуществляется развитие метрополитенов таких городов, как Москва, Санкт-Петербург, Нижний Новгород, Казань и др. Чаще всего сооружения станционных комплексов, пересадочных узлов, притоннельные сооружения возводятся открытым способом в условиях плотной городской застройки, что неизбежно оказывает влияние на развитие дополнительных деформаций окружающего грунтового массива, фундаментов зданий и сооружений. Таким образом, при проектировании заглубленных сооружений, а также подземных многоуровневых частей зданий необходимо проводить количественную оценку изменения напряженно-деформированного состояния прилегающего грунтового массива, в том числе оснований зданий и сооружений, расположенных в предварительно назначенной зоне влияния строительства.

Оценка влияния нового строительства на существующие здания и сооружения является одной из сложнейших геотехнических задач. Научно-практический подход к решению данной задачи позволяет обеспечить безопасную эксплуатацию зданий и сооружений в зоне влияния строительства заглубленных сооружений. Зона влияния существенно зависит от габаритов, глубины и формы котлована (квадратная, прямоугольная и др.), а также от физико-механических свойств грунтов окружающего массива.

В ходе становления и дальнейшего развития науки механики грунтов как теоретической и прикладной дисциплины появились решения инженерных задач на основе теории упругости. Многие из них на сегодняшний день остаются актуальными, так как на их основе возможно развитие новых аналитических решений нелинейной механики грунтов. Однако по-прежнему отсутствуют решения, позволяющие учитывать одновременно большой спектр факторов, формирующих напряженно-деформированное состояние массивов грунтов, таких как расстояние здания от котлована, нагрузку на фундамент, габариты фундамента. Кроме того, неучет упругопластического поведения грунта в условиях нахождения здания или сооружения вблизи котлована может привести к расхождению расчетных и фактических осадок и кренов, что влечет за собой необеспечение безопасности и дальнейшей эксплуатации существующих зданий и сооружений.

Безусловно, большой интерес представляют методы расчета, позволяющие прогнозировать деформации оснований и фундаментов вблизи котлована с учетом вязкоупругих свойств основания во времени. Несмотря на значительный накопленный теоретический опыт, экспериментальные исследования, существование большого количества реологических моделей, остаются нерешенными вопросы постановки и решения краевых задач по определению компонент напряженно-деформированного состояния грунтовых оснований с учетом нелинейных и реологических свойств деформирования, что также оказывает влияние на безопасность и эксплуатацию зданий и сооружений, находящихся вблизи котлованов.

Аналитические методы расчета подобных задач в линейной и упругой постановке позволяют осуществить учет перечисленных факторов и довести решения до простых формул, используемых при проектировании в первом приближении. Однако учет широкого спектра факторов при количественной оценке НДС системы «сооружение -грунтовой массив-ограждение котлована» сопряжен со значительными трудностями, особенно без использования численного моделирования при помощи программно-вычислительных комплексов PC MathCAD, ПК PLAXIS, ПК Midas и др.

Степень разработанности темы. Количественное прогнозирование деформаций системы «сооружение -грунтовой массив-ограждение котлована», в том числе и во времени является одной из наиболее трудоемких и комплексных задач механики грунтов. В ходе становления и дальнейшего развития теоретической базы науки механики грунтов, в частности развития теории консолидации и ползучести, были решены основные вопросы в научных трудах, созданными Терцаги К., Герсевановым Н.М., Цытовичем Н.А., Флориным В.А, Вяловым С.С., Егоровым К.Е., Масловым Н.Н., Малышевым М.В., Месчаном С.Р., Ю.К. Зарецким, Тер-Мартirosяном З.Г., Ильичевым В.А., Улицким В.М., Королевым К.В., Мирсаяповым И.Т., Королевой И.В. и др. Однако, тема прогноза НДС оснований и фундаментов вблизи бортов котлованов с учетом различных параметров расчетной схемы, расчета осадок, в том числе и во времени, а также длительной устойчивости оснований, является недостаточно разработанной. Существующие методики оценки НДС грунтовых оснований не позволяют в достаточной степени точности описывать нелинейное изменение объема и формы с учетом упругопластических и реологических свойств грунтов.

Дополнительно стоит отметить, что при выполнении расчетов осадок зданий и сооружений вблизи бровки котлована учет упругопластического поведения грунтов основания имеет большую необходимость, так как в основании возникают значительные зоны развития дополнительных пластических деформаций.

Важно подчеркнуть, что расчетные упругопластические и реологические модели, позволяющие получить графики «осадка – нагрузка» ($S-p$) «осадка-время» ($S-t$) с двойной кривизной к настоящему времени разработаны З.Г. Тер-Мартirosяном, А.З. Тер-Мартirosяном и др., а также ведется дальнейшая работа по их усовершенствованию. На основе принципа разделения общей деформации в виде суммы объемной и сдвиговой составляющих ($\epsilon = \epsilon_v + \epsilon_\gamma$), а также согласно системе физических уравнений Генки и включающих в нее упругопластических и упруговязких моделей грунтов, можно получить зависимость между напряжениями и деформациями в виде кривой ($\epsilon - \sigma$) с двойной кривизной.

Цель работы заключается в совершенствовании методов прогноза напряженно-деформированного состояния массивов грунтов, взаимодействующих с подземными конструкциями (ограждениями котлованов), при действии дополнительной нагрузки вблизи бортов котлованов с учетом упругих, упругопластических и вязкоупругих свойств грунтов.

Задачи исследования

1. Проанализировать существующие линейные и нелинейные решения для прогноза кратковременных и длительных осадок и несущей способности грунтовых оснований фундаментов, в том числе аналитические решения по определению компонентов напряженного состояния грунтовых массивов;
2. Решить краевую задачу об НДС грунтового основания при воздействии фундамента с распределенной нагрузкой вблизи борта котлована на основе решения задачи Фламана аналитическим методом;
3. Решить краевую задачу об НДС грунтового основания при воздействии фундамента с распределенной нагрузкой вблизи борта котлована на глубине на основе решения задачи Э. Мелана аналитическим методом;
4. Решить краевую задачу об НДС грунтового основания, опирающегося на несжимаемый слой грунта, при воздействии распределенной нагрузки вблизи борта котлована методом тригонометрических рядов Рибьера-Файлона аналитическим и численным методами;
5. Решить задачи по определению кратковременных и длительных осадок и устойчивости массива грунта, опирающегося на несжимаемое основание, при воздействии распределенной нагрузки вблизи борта котлована с учетом упругопластических и вязкоупругих свойств грунта и выявить определяющие факторы.

Объектом исследования является массив грунта, опирающийся на несжимаемое основание, при воздействии распределенной нагрузки вблизи борта котлована.

Предметом исследования является оценка напряженно-деформированного состояния массива грунта, опирающегося на несжимаемое основание, при воздействии распределенной нагрузки вблизи борта котлована с учетом упругопластических и вязкоупругопластических свойств.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Решение и анализ краевой задачи об НДС массива грунта, опирающегося на несжимаемое основание, при воздействии распределенной нагрузки вблизи борта котлована методом тригонометрических рядов Рибьера-Файлона. Полученные результаты верифицированы при помощи ПК PLAXIS 2D, что подтверждает применимость данного метода для определения напряжений в массивах грунтов вблизи бортов котлованов;
2. Выполнены расчеты кратковременной осадки и несущей способности массива грунта, опирающегося на несжимаемое основание, при воздействии распределенной нагрузки вблизи борта котлована. Показано, что использование определяющей системы физических уравнений Г. Генки, в состав которой входят упруго-пластическая модель для определения сдвиговой деформации С.П. Тимошенко и модель для определения объемной деформации С.С. Григоряна, позволяет прогнозировать осадку и несущую способность основания в виде графика «осадка – нагрузка» ($S - p^{**}$) с двойной кривизной. Также показано существенное влияние параметра расстояния распределенной нагрузки до борта котлована.

3. Выполнены расчеты осадки во времени и длительной устойчивости массива грунта, опирающегося на несжимаемое основание, при воздействии распределенной нагрузки вблизи борта котлована. Расчеты длительной осадки и устойчивости показали, что использование определяющей системы уравнений Г. Генки, где использованы модель вязкоупругопластической деформации, разработанная научным коллективом НОЦ «Геотехника» и модель объемной вязкоупругой деформации Кельвина – Фойгта, позволяет получить график «осадка – время» ($S(t) - t$) с траекторией двойной кривизны с пределом длительной устойчивости. Это позволяет прогнозировать во времени устойчивость грунтового основания в зависимости от реологических параметров грунта, а также величины и ширины нагрузки, ее расстояния до борта котлована.

Теоретическая и практическая значимость работы

Рассмотрены новые подходы к определению напряженно-деформированного состояния массивов грунтов при воздействии распределенной нагрузки вблизи бортов котлованов на основе различных решений. В том числе для случая краевой задачи об НДС массива грунта, опирающегося на несжимаемое основание, при воздействии распределенной нагрузки вблизи борта котлована произведен прогноз осадок, в том числе и во времени, несущей способности оснований и длительной устойчивости с использованием моделей сдвиговой деформации С.П. Тимошенко и объемной деформации С.С. Григоряна (для определения кратковременной осадки и несущей способности грунтового основания) и моделей сдвиговой вязкоупругопластической деформации, разработанной научным коллективом НОЦ «Геотехника», и вязкоупругой деформации Кельвина – Фойгта (для определения длительной осадки и устойчивости грунтового основания) на основе определяющей системы физических уравнений Г. Генки.

Методология и методы исследований

Решение поставленных задач в диссертационном исследовании основано на решении задачи Фламана, задачи Мелана, методе тригонометрических рядов Рибьера-Файлона, определяющей системе физических уравнений Г. Генки, основах теории упругости, ползучести и пластичности. В расчетах с использованием МКЭ использовалась модель Кулона – Мора. Для определения суммарной осадки основания использован метод послойного суммирования.

Личный вклад автора заключается:

- в решении краевых задач по определению компонент напряженного состояния массивов грунтов при воздействии распределенной нагрузки вблизи бортов котлованов на основе решения задачи Фламана, Э. Мелана и метода тригонометрических рядов Рибьера-Файлона;
- в определении осадки и несущей способности массивов грунтов, опирающихся на несжимаемое основание, при воздействии распределенной нагрузки вблизи бортов котлованов по упругопластической модели на основе системы физических уравнений Г. Генки, в которую входят уравнения для определения сдвиговой деформации С.П. Тимошенко и объемной деформации С.С. Григоряна;
- в определении длительной осадки и устойчивости массивов грунтов, опирающихся на несжимаемое основание, при воздействии распределенной нагрузки

вблизи бортов котлованов по упруговязкопластической модели на основе системы физических уравнений Г. Генки, в которую входят уравнения для определения сдвиговой вязкопластической деформации и объемной деформации Кельвина-Фойгта.

Положения, выносимые на защиту

- Результаты решения краевой задачи об НДС грунтового основания при воздействии фундамента с распределенной нагрузкой вблизи борта котлована на основе решения задачи Фламана аналитическим методом
- Результаты решения краевой задачи об НДС грунтового основания при воздействии фундамента с распределенной нагрузкой вблизи борта котлована на глубине на основе решения задачи Э. Мелана аналитическим методом;
- Результаты решения краевой задачи об НДС грунтового основания конечной толщины, опирающегося на несжимаемый слой грунта, при воздействии распределенной нагрузки вблизи борта котлована методом тригонометрических рядов Рибьера-Файлона;
- Результаты расчета кратковременной осадки и несущей способности грунтового основания конечной толщины, опирающегося на несжимаемое основание, при воздействии распределенной нагрузки вблизи борта котлована, где в состав системы физических уравнений Генки входят модель С.П. Тимошенко для определения сдвиговой деформации и модель С.С. Григоряна;
- Результаты расчета осадки во времени и длительной устойчивости грунтового основания конечной толщины, опирающегося на несжимаемое основание, при воздействии распределенной нагрузки вблизи борта котлована, где в состав системы физических уравнений Г. Генки входят модель сдвиговой составляющей вязкоупругой деформации, разработанная научным коллективом НОЦ «Геотехника», и модель объемной составляющей деформации вязкоупругая модель Кельвина – Фойгта.

Степень достоверности результатов исследования

Результаты расчета и анализа напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов вблизи бортов котлованов при действии распределенной нагрузки, получены на основе тригонометрических рядов Рибьера-Файлона, определяющей системы физических уравнений Г. Генки для упругопластической и вязкоупругопластической постановок задач, в частности следующих расчетных моделей грунта: упругой модели Гука, идеальноупругопластической модели Мора-Кулона, уравнений для определения сдвиговой деформации С.П. Тимошенко, уравнения для определения объемной деформации С.С. Григоряна, вязкоупругопластической модели грунта, разработанной коллективом НОЦ «Геотехника» и вязкоупругой модели Кельвина – Фойгта, при решении краевых задач, рассмотренных в диссертации.

Апробация работы

Результаты диссертационного исследования были представлены на научных конференциях:

- 1) VIII Международная научная конференция «Интеграция, партнёрство и инновации в строительной науке и образовании». Тема доклада: «Длительная осадка и несущая способность оснований и фундаментов вблизи вертикальной выемки». 10-11 ноября 2022 года, НИУ МГСУ, Москва;
- 2) 26-й Международная конференция Construction The Formation Of Living Environment (FORM-2023). Тема доклада «Settlement and bearing capacity of soil basis near vertical excavation». 26-28 апреля 2023 года, НИУ ТИИИМСХ, Ташкент.

Результаты диссертационного исследования были внедрены в процесс проектирования строительных объектов метрополитена в условиях плотной городской застройки в рамках предпроектной проработки.

Публикации

По теме диссертационного исследования опубликовано 9 печатных научных работ, в том числе 3 работы – в рецензируемых журналах из перечня, рекомендованного ВАК Министерства образования и 6 работ в журналах, входящих в базу данных Scopus. Также автор приняла участие в подготовке учебного пособия «Механика грунтов в высотном строительстве с развитой подземной частью» (Тер-Мартиросян З. Г., Тер-Мартиросян А. З., 2020), в котором приведены результаты решения научных и прикладных задач по теме диссертационного исследования.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня сокращений и условных обозначений и списка литературы. Общий объем составляет 158 страниц, 102 рисунка, 3 таблицы. Список литературы содержит 144 наименования, в том числе иностранных.

Благодарности

Диссертация выполнена на кафедре Механики грунтов и геотехники НИУ МГСУ. Работа выполнена под руководством Почетного академика РААСН, Лауреата премии Правительства Российской Федерации, Заслуженного деятеля науки РФ, почетного профессора НИУ МГСУ, доктора технических наук, профессора кафедры «Механика грунтов и геотехника» З.Г. Тер-Мартиросяна и доктора технических наук, профессора кафедры «Механика грунтов и геотехника» А.З. Тер-Мартиросяна.

Свое глубокое уважение и признательность автор выражает ушедшему научному руководителю, Лауреату премии Правительства Российской Федерации, Заслуженному деятелю науки Российской Федерации, Почетному академику Российской академии архитектурных и строительных наук, почетному профессору НИУ МГСУ, доктору технических наук, профессору кафедры «Механика грунтов и геотехника» Завену Григорьевичу Тер-Мартиросяну за бесценные приобретённые знания и опыт, полученные при работе с ним, за наставления, формирование основной идеи научно-исследовательской работы, постоянную помощь и консультации.

Автор также благодарит Армена Завеновича Тер-Мартиросяна за помощь, ценные практические советы и консультации в научно-исследовательской работе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

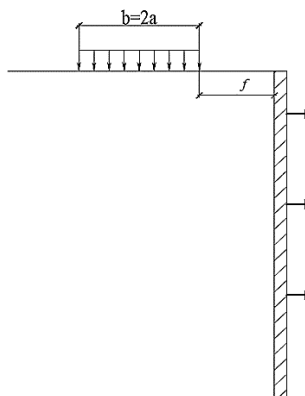
Первая глава представляет собой анализ научной литературы в области современного состояния вопроса определения напряженно-деформированного состояния оснований и фундаментов вблизи бортов котлованов, в том числе обладающих упругопластическими и вязкоупругопластическими свойствами.

Вторая глава посвящена решению краевых задач о напряженном состоянии оснований фундаментов вблизи бортов котлованов.

Задача о распределении напряжений в массиве грунта под воздействием распределенной нагрузки на расстоянии от ограждения котлована на основе решения задачи Фламана

Рассматривается задача о напряженно-деформированном состоянии массива грунта под воздействием распределенной нагрузки вблизи ограждения котлована. В общем случае данной задачи рассматривается действие распределенной нагрузки $q=const$ на горизонтальном участке шириной $b=2a$ на расстоянии f от ограждения котлована. Принимается, что вертикальная стена ограждения котлована закреплена распорными конструкциям, но допускаются вертикальные перемещения грунтов (рисунок 2.1а). В этом случае задача сводится к случаю, когда на поверхности полуплоскости по полосе шириной $B=2f+4a$ действует распределенная нагрузка за вычетом действия распределенной нагрузки по полосе $2f$ (рисунок 2.1б).

а)



б)

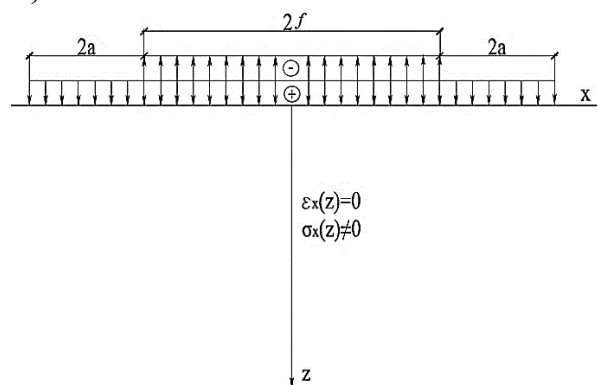


Рисунок 2.1. а) Схема к определению НДС за ограждением котлована; б) эквивалентная расчетная схема.

В качестве исходного для решения поставленной задачи примем известное решение плоской задачи теории упругости для полупространства при действии нагрузки $q=const$ по полосе шириной $b=2a$, т.е. имеем:

$$\sigma_x = \frac{q}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{a-x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{a+x}{z} \right] + \frac{2aqz(x^2 - z^2 + a^2)}{\pi \cdot [(x^2 - z^2 - a^2)^2 + 4a^2z^2]} \quad (2.1)$$

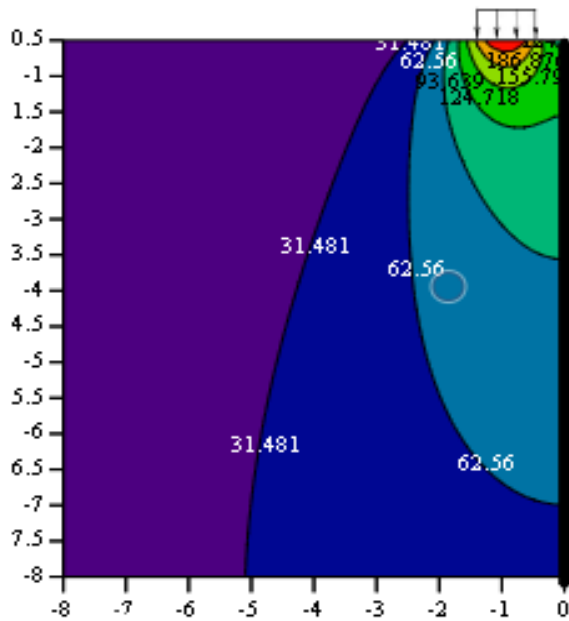
$$\sigma_z = \frac{q}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{a-x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{a+x}{z} \right] - \frac{2aqz(x^2 - z^2 + a^2)}{\pi \cdot [(x^2 - z^2 - a^2)^2 + 4a^2z^2]} \quad (2.2)$$

$$\tau_{xz} = \frac{q}{\pi} \frac{4axz^2}{[(x-a)^2 + z^2][(x+a)^2 + z^2]} \quad (2.3)$$

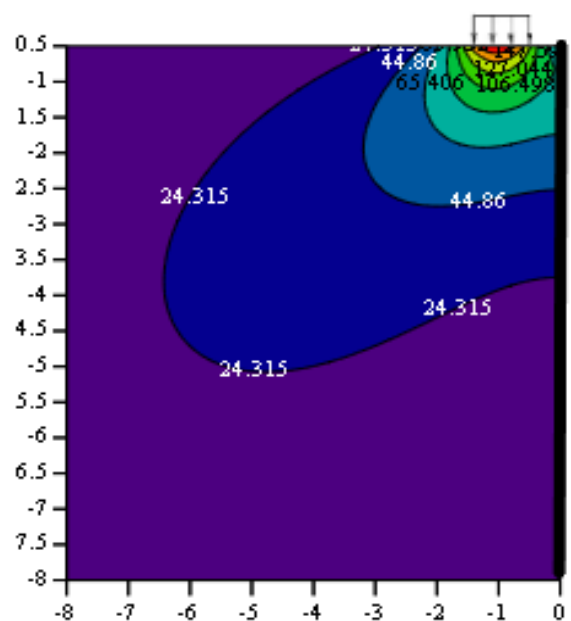
$$\sigma = \frac{2p(1-\nu)}{3\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{a-x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{a+x}{z} \right] \quad (2.4)$$

Результаты решения данной задачи получены в ПК MathCAD и приводятся к виду изолиний напряжений σ_x , σ_z , τ_{xz} по всей плоскости при $z > 0$ и $\pm x$ (рисунок 2.2 а,б,в)

а)



б)



в)

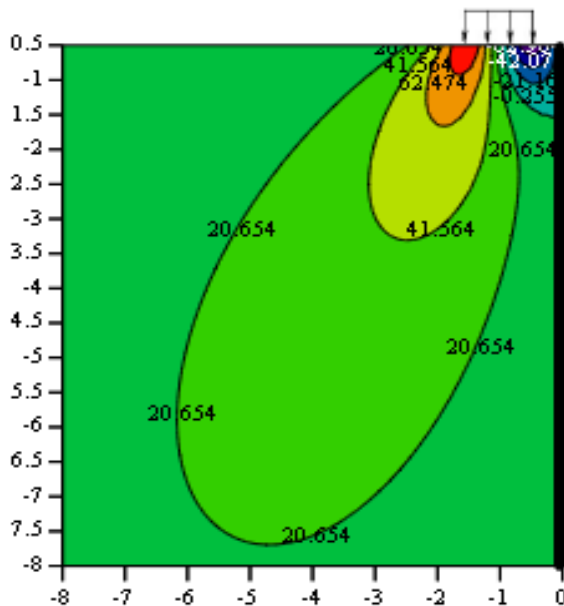


Рисунок 2.2. Изолинии напряжений от действующей распределенной нагрузки $q = \text{const} = 400$ кПа по полосе шириной $B = f + 2a$ за вычетом действия распределенной нагрузки по полосе f :

а) вертикальных напряжений σ_z ;

б) горизонтальных напряжений σ_x ;

в) касательных напряжений τ_{xz} .

Задача о распределении напряжений в массиве грунта при действии распределенной нагрузки на глубине и на расстоянии от борта котлована на основе решения задачи Мелана

Для определения НДС грунтового основания при действии распределенной нагрузки $q = \text{const}$ по полосе шириной $b = 2a$ на глубине d на расстоянии f было использовано решение Э. Мелана (рисунок 2.3)

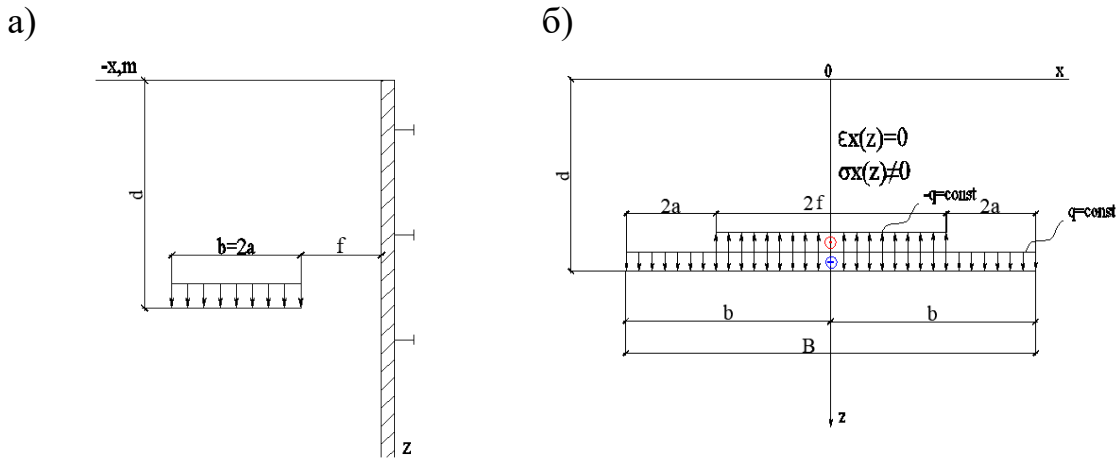


Рисунок 2.3. а) Схема для определения НДС при действующей нагрузке на глубине; б) Расчетная схема для определения НДС при $q=const$ по полосе шириной $B=2a+2f$ за вычетом действия распределенной нагрузки по полосе $2f$ на глубине d

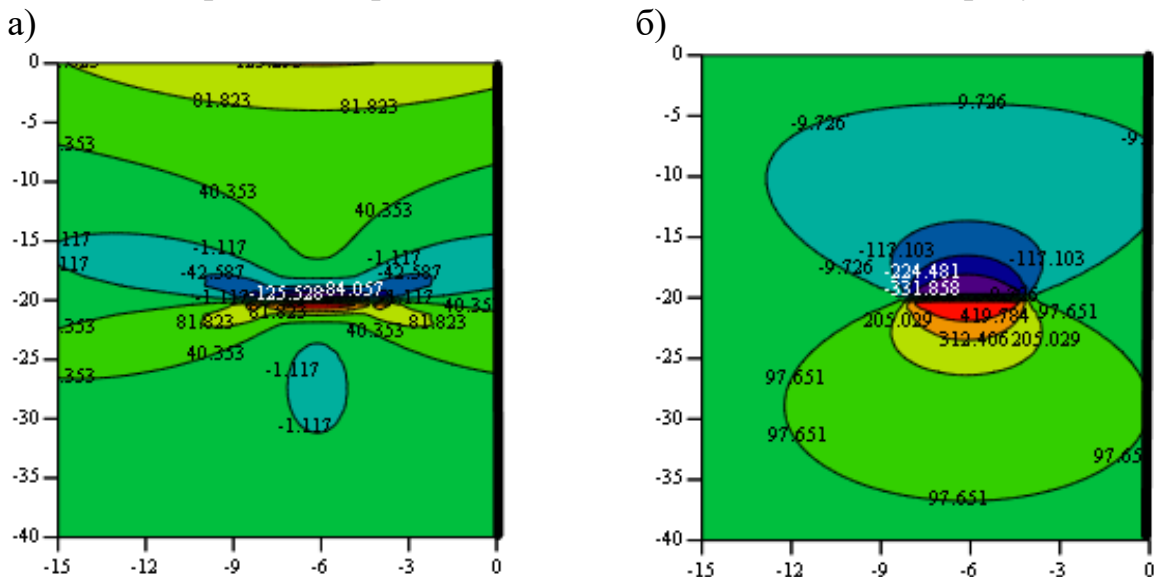
Результаты интегрирования уравнений Э. Мелана представлены ниже.

$$\sigma_z = \int_{-a}^a \frac{q}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[\frac{(z-d)^3}{r_1^4} + \frac{(z+d)[(z+d)^2+2dz]}{r_2^4} - \frac{8dz(z+d)(x+\xi)}{r_2^6} \right] + \frac{m-1}{4m} \left[\frac{z-d}{r_1^2} + \frac{3z+d}{r_2^2} - \frac{4z(x-\xi)^2}{r_2^4} \right] \right\} d(x-\xi) \quad (2.6)$$

$$\sigma_x = \int_{-a}^a \frac{q}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[\frac{(z-d)(x-\xi)^2}{r_1^4} + \frac{(z+d)[(x-\xi)^2+2d^2]-2d(x-\xi)^2}{r_2^4} + \frac{8dz(z+d)(x+\xi)^2}{r_2^6} \right] + \frac{m-1}{4m} \left[\frac{z-d}{r_1^2} + \frac{3z+d}{r_2^2} - \frac{4z(x-\xi)^2}{r_2^4} \right] \right\} d(x-\xi) \quad (2.7)$$

$$\tau_{zx} = \int_{-a}^a \frac{q(x-\xi)}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[\frac{(z-d)^4}{r_1^4} + \frac{z^2-2dz-d^2}{r_2^4} + \frac{8dz(z+d)^2}{r_2^6} \right] + \frac{m-1}{4m} \left[\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \frac{4z(z+d)}{r_2^4} \right] \right\} d(x-\xi) \quad (2.8)$$

Аналитический расчет при помощи ПК MathCAD позволил определить компоненты напряжений при $q=250$ кПа, $d=20$ м, $b=2a+c=8$ м (рисунок 2.4 а, б, в)



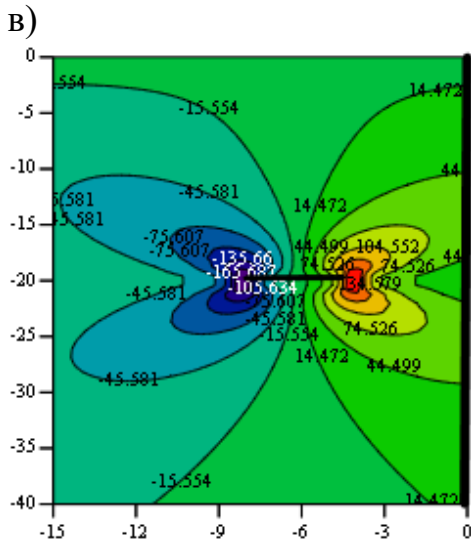


Рисунок 2.4. а) Изолинии горизонтальных напряжений при действии нагрузки по полосе шириной $b=2a+f$ на глубине d ; б) Изолинии вертикальных напряжений при действии нагрузки по полосе шириной $b=2a+f$ на глубине d ; в) Изолинии касательных напряжений при действии нагрузки по полосе шириной $b=2a+f$ на глубине d .

Задача о распределении напряжений в массиве грунта конечной ширины и толщины, опирающегося на несжимаемое основание, под воздействием распределенной нагрузки на расстоянии от борта котлована

Для моделирования ситуации, когда на поверхности грунта приложена равномерно распределенная нагрузка шириной $b=2a$ на расстоянии f от вертикальной выемки, рассматривается прямоугольная область в пределах от 0 до h по высоте и от $-l$ до 0 по ширине согласно модели конечной мощности (h) и ширины ($2l$) З.Г. Тер-Мартirosяна. (рисунок 2.5)

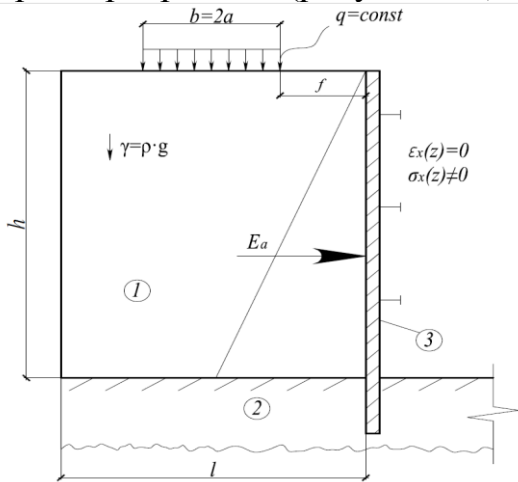


Рисунок 2.5. Расчетная схема взаимодействия весомого слоя (1) толщиной (h), опирающегося на несжимаемое основание (2), с вертикальной неподвижной стеной ограждения котлована (3) при воздействии распределенной нагрузки $q=const$ по полосе $b=2a$ на расстоянии f от ограждения.

Для рассматриваемой задачи примем следующие граничные условия на верхней и нижней границах области массива.

$$\begin{aligned} \text{при } z=0 \text{ и } z=2h: \sigma_z(x,0) = \sigma_z(x,2h) = q \\ (-a \leq x \leq a); \sigma_z(x,0) = \sigma_z(x,2h) = 0 \quad (-l \leq x \leq -a) \text{ и } (a \leq x \leq l); \\ \text{при } z=0 \text{ и } z=2h: \tau_{xz}(x,0) = 0; \tau_{xz}(x,2h) = 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Для рассматриваемой задачи выражения (2.12-2.15) примут вид:

$$\begin{aligned} \sigma_z(x,z) = \frac{q(b+f)}{l} - \frac{qf}{l} + \\ + \frac{4q}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\left(\sin \frac{m\pi(b+f)}{l} - \sin \frac{m\pi f}{l} \right) \left[\left(\frac{m\pi h}{l} ch \frac{m\pi h}{l} + sh \frac{m\pi h}{l} \right) ch \frac{m\pi(z-h)}{l} - \frac{m\pi(z-h)}{l} sh \frac{m\pi(z-h)}{l} sh \frac{m\pi h}{l} \right]}{sh \frac{2m\pi h}{l} + \frac{2m\pi h}{l}} \cos \frac{m\pi x}{l} \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\sigma_x(x, z) = \left(\frac{q(b+f)}{l} - \frac{qf}{l} \right) \frac{\nu}{1-\nu} - \frac{4q}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\left(\sin \frac{m\pi(b+f)}{l} - \sin \frac{m\pi f}{l} \right) \left[\left(\frac{m\pi h}{l} \operatorname{ch} \frac{m\pi h}{l} - \operatorname{sh} \frac{m\pi h}{l} \right) \operatorname{ch} \frac{m\pi(z-h)}{l} - \frac{m\pi(z-h)}{l} \operatorname{sh} \frac{m\pi(z-h)}{l} \operatorname{sh} \frac{m\pi h}{l} \right]}{\operatorname{sh} \frac{2m\pi h}{l} + \frac{2m\pi h}{l}} \cos \frac{m\pi x}{l} \quad (2.13)$$

$$\tau_{xz}(x, z) = -\frac{4q}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\left(\sin \frac{m\pi(b+f)}{l} - \sin \frac{m\pi f}{l} \right) \left[\frac{m\pi h}{l} \operatorname{ch} \frac{m\pi h}{l} \operatorname{sh} \frac{m\pi(z-h)}{l} - \frac{m\pi(z-h)}{l} \operatorname{ch} \frac{m\pi(z-h)}{l} \operatorname{sh} \frac{m\pi h}{l} \right]}{\operatorname{sh} \frac{2m\pi h}{l} + \frac{2m\pi h}{l}} \sin \frac{m\pi x}{l} \quad (2.14)$$

$$\sigma_m(x, z) = \frac{1+\nu}{3} \left[\left(\frac{q(b+f)}{l} - \frac{qf}{l} \right) \frac{1}{1-\nu} + \frac{8q}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi a}{l} \operatorname{sh} \frac{m\pi a}{l} \operatorname{ch} \frac{m\pi(z-h)}{l}}{\operatorname{sh} \frac{2m\pi h}{l} + \frac{2m\pi h}{l}} \cos \frac{m\pi x}{l} \right] \quad (2.15)$$

Расчет выполнен для параметров $q=100$ кПа, $f=6$ м, $b=2a=3$ м (рисунок 2.6)

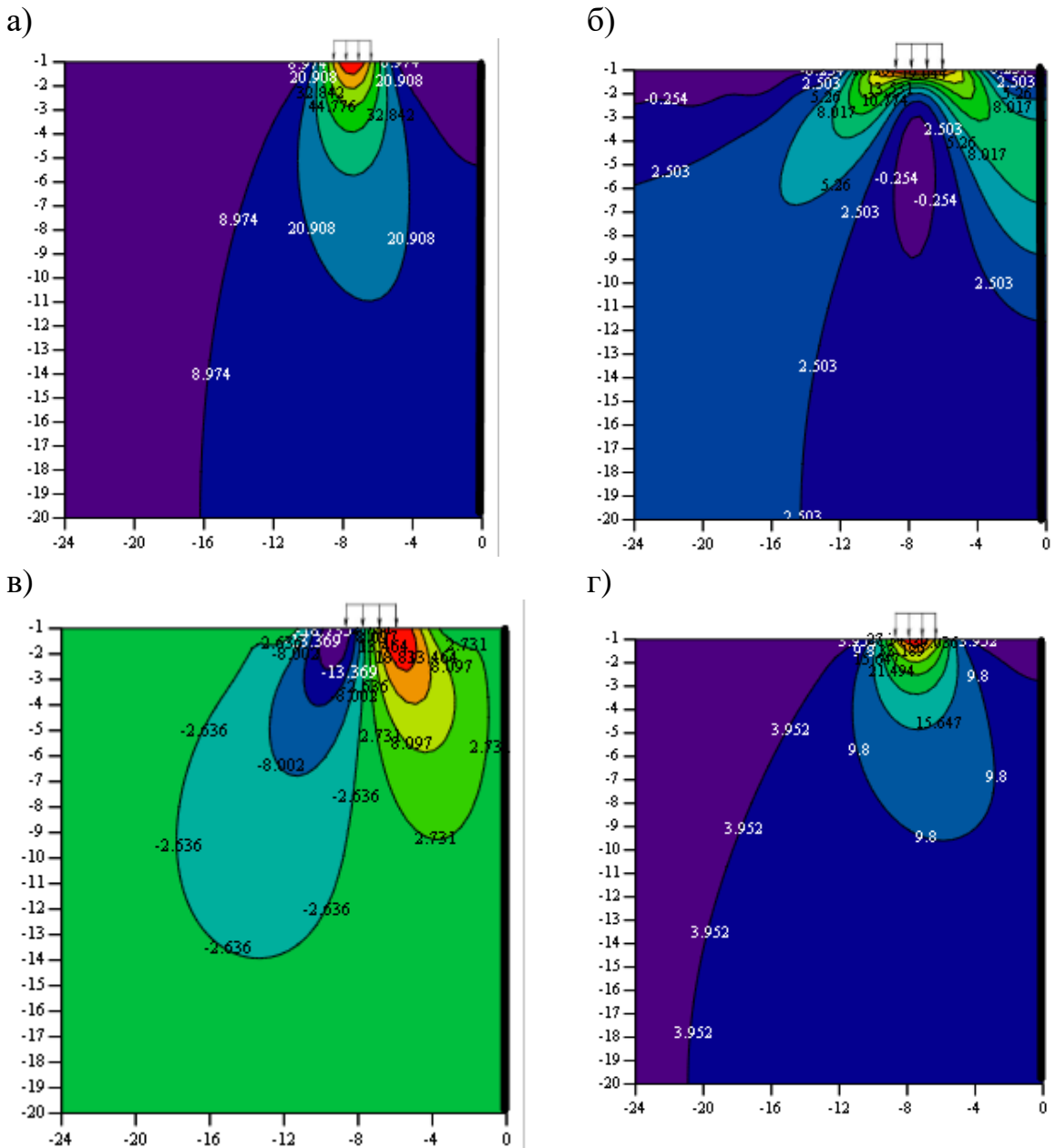


Рисунок 2.6. Изолинии напряжений: при действии нагрузки $q=const=100$ кПа на расстоянии от бровки котлована $f=6$ м: а) горизонтальных напряжений σ_x ; б) вертикальных напряжений σ_z ; в) касательных напряжений τ_{xz} ; г) средних напряжений σ_m

Для сравнения вертикальных напряжений, полученных при аналитическом и численном решениях задачи, были построены изолинии напряжений по глубине в центре распределенной нагрузки. Сопоставление результатов производилось при параметрах задачи $q=100$ кПа, $f_1=6$ м, $b=2a=3$ м (рисунок 2.7).

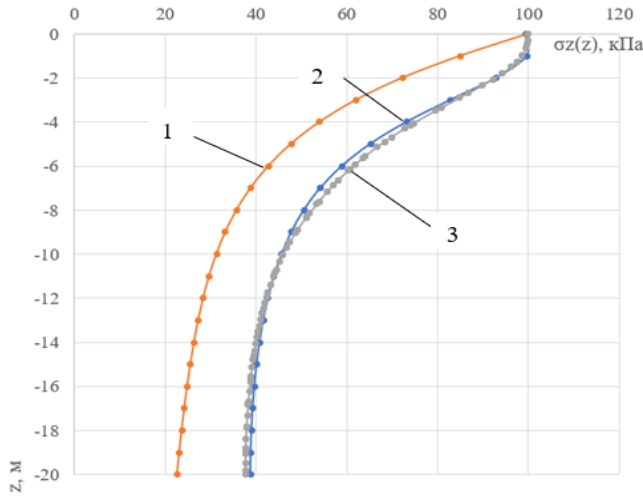
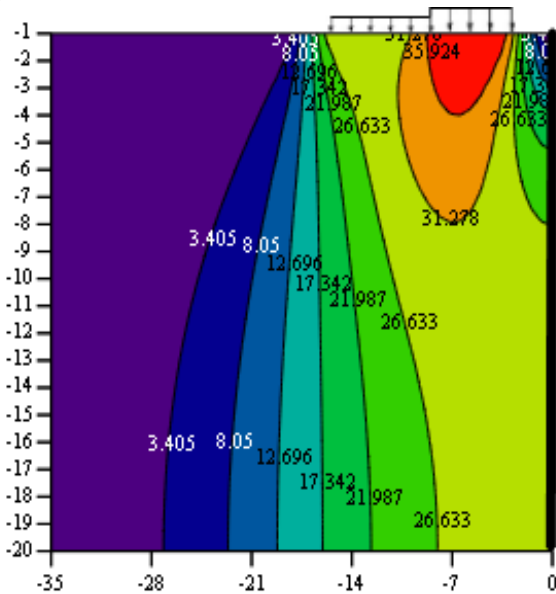


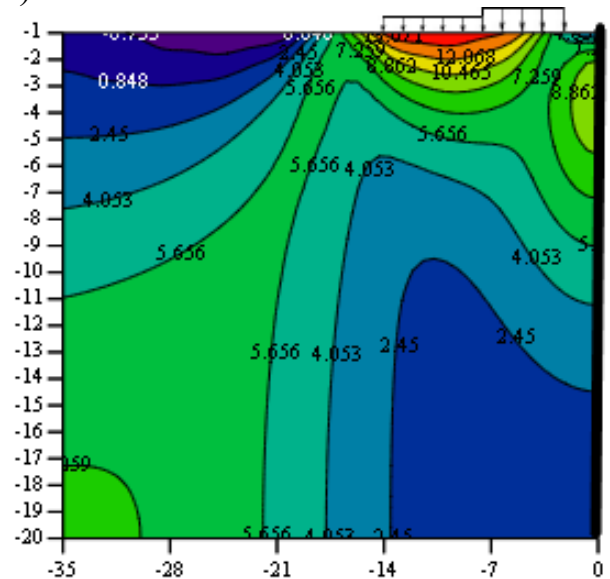
Рисунок 2.7. Распределение вертикальных напряжений σ_z , полученное по решению Фламана (график № 1), полученное по методу тригонометрических рядов Рибьера-Файлона (график № 2) и по численному решению в ПК PLAXIS 2D (график №3).

Также решение по формулам (2.12-2.15) возможно записать для случая одновременного приложения двух распределенных нагрузок разной интенсивности (q_1 и q_2) разной или одинаковой ширины (b_1 и b_2) на расстоянии f от борта котлована. Рассмотрен случай приложения распределенных нагрузок $q_1=30$ кПа, $b_1=7$ м и нагрузки $q_2=15$ кПа, $b_2=7$ м на расстоянии $f=2$ м (рисунок 2.8).

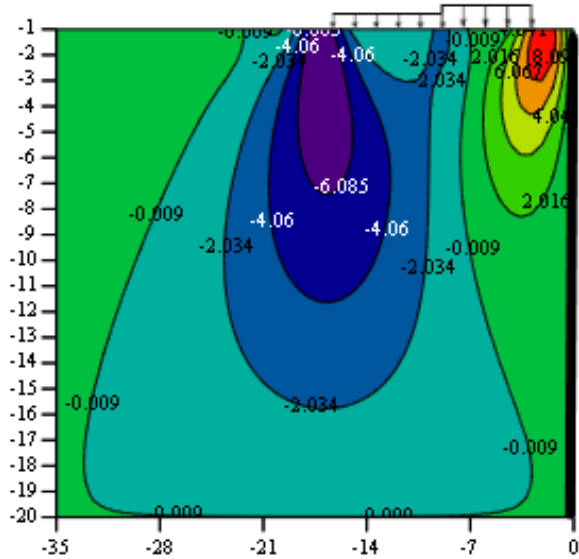
а)



б)



в)



г)

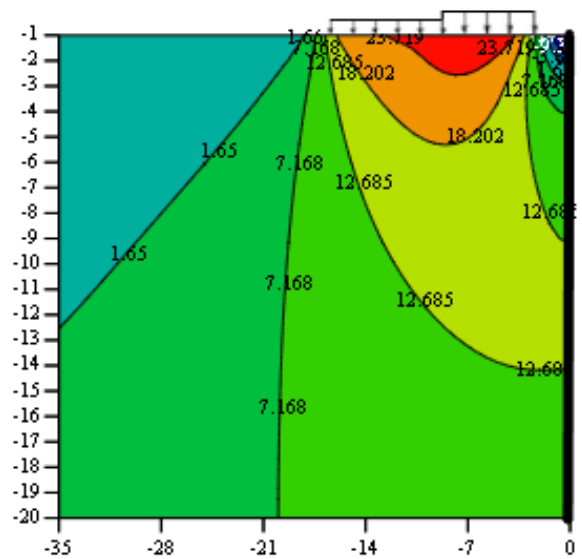


Рисунок 2.8. Изолинии напряжений от действующей распределенной нагрузки $q_1 = \text{const} = 30$ кПа, $b_1 = 7$ м, $q_2 = \text{const} = 15$ кПа, $b_2 = 7$ м на расстоянии от бровки котлована $f = 2$ м: а) горизонтальных напряжений σ_x ; б) вертикальных напряжений σ_z ; в) касательных напряжений τ_{xz} ; г) средних напряжений σ_m

В третьей главе приведено решение задачи по определению осадки и несущей способности массива грунта, опирающегося на несжимаемое основание, при действии распределенной нагрузки вблизи борта котлована с учетом упругопластических свойств грунтов. Для расчетов была применена определяющая система физических уравнений Генки, которая имеет следующий вид:

$$\varepsilon_x = \chi(\sigma_x - \sigma_m) + \chi^* \cdot \sigma_m; \gamma_{xy} = 2\chi \cdot \tau_{xy} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_y = \chi(\sigma_y - \sigma_m) + \chi^* \cdot \sigma_m; \gamma_{yz} = 2\chi \cdot \tau_{yz} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_z = \chi(\sigma_z - \sigma_m) + \chi^* \cdot \sigma_m; \gamma_{zx} = 2\chi \cdot \tau_{zx} \quad (3.3)$$

где

$$\chi = \frac{\gamma_i}{2\tau_i} = \frac{f(\tau_i, \sigma_m, \mu_\sigma)}{2\tau_i}; \quad (3.4)$$

$$\chi^* = \frac{\varepsilon_m}{\sigma_m} = \frac{f^*(\tau_i, \sigma_m, \mu_\sigma)}{2\tau_i}; \quad (3.5)$$

τ_i - интенсивность касательных напряжений, μ_σ - параметр вида НДС по Надаи-Лоде, причем вид функций χ и χ^* определяют по результатам экспериментальных исследований.

Согласно (3.3) общую вертикальную деформацию с учетом разделения на деформацию сдвига ε_γ и объемную деформацию ε_v можно определить следующим уравнением:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z - \sigma_m}{G(\sigma_m, \tau_i / \tau_i^*)} + \frac{\sigma_m}{K}; \quad (3.6)$$

где $G(\sigma_m, \tau_i/\tau_i^*)$ и $K(\sigma_m)$ – модули сдвиговой и объемной деформации, в зависимости от среднего напряжения σ_m , а также соотношения действующего касательного напряжения τ_i и его предельного значения τ_i^* , т.е. τ_i/τ_i^* , где $\tau_i^* = \sigma_m \operatorname{tg} \varphi + c$.

В качестве расчетной для определения нелинейных объемных деформаций принята зависимость, предложенная академиком РАН С.С. Григоряном, следующего вида:

$$\varepsilon_m(\sigma_m) = \varepsilon^* (1 - e^{-\alpha \sigma_m}) \quad (3.7)$$

где ε - объемная деформация;

ε^* - предельное значение объемной деформации (рисунок 3.1), достигаемое при $\sigma_m \rightarrow 0$;

α – экспериментальная константа.

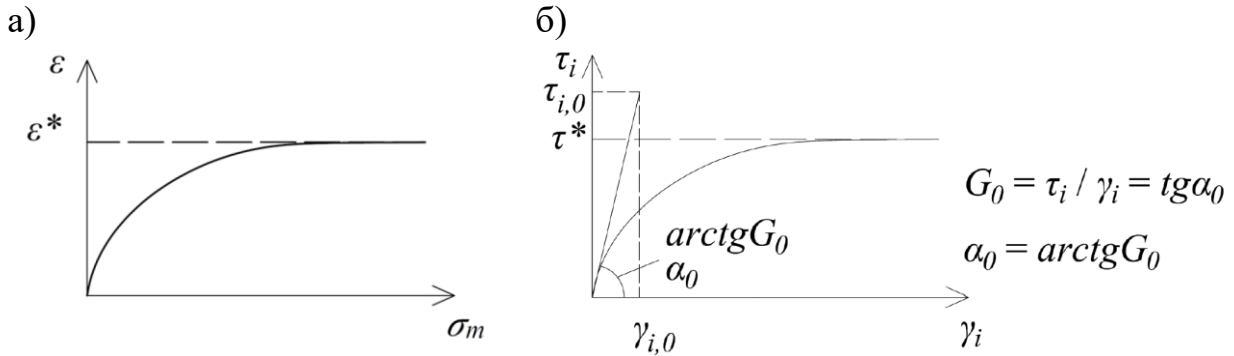


Рисунок 3.1. а) Общий вид зависимости $\varepsilon - \sigma_m$; б) Зависимость между касательными напряжениями и угловой деформацией по гиперболическому закону $\tau - \gamma$

Для описания упругопластических свойств связного грунта при сдвиге использовалась гиперболическая зависимость, предложенная С.П. Тимошенко, которая применительно к грунтовой среде имеет следующий вид:

$$\gamma_i = \frac{\tau_i}{G^0} \frac{\tau_i^*}{\tau_i^* - \tau_i} \quad (3.8)$$

где γ_i – интенсивность угловой деформации;

τ_i – действующие значения интенсивности касательных напряжений;

τ_i^* - предельные значения интенсивности касательных напряжений;

G^0 – модуль сдвига (упругости) на начальном участке кривой $\gamma_i - \tau_i$.

Секущий модуль сдвига определяется по формуле:

$$G = G^0 \left(1 - \frac{\tau_i^*}{\tau_i^* - \tau_i}\right) \quad (3.9)$$

Итоговые выражения для определения объемной и сдвиговой деформаций примут вид:

$$\varepsilon_{z,vi} = \varepsilon^* (1 - e^{-\alpha \sigma_m}) \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{z,\gamma i} = \frac{\sigma_z - \sigma_m}{2G(\sigma_m, \tau_i / \tau_i^*)}; \quad (3.11)$$

Относительные деформации слоев грунта в пределах сжимаемой толщи основания по формуле (3.12) можно определить методом послойного суммирования или интегрированием:

$$\varepsilon_z = \int_0^z \{ \varepsilon_{z,\gamma i} + \varepsilon_{z,\nu i} \} dz = \int_0^z \left\{ \frac{\sigma_z - \sigma_m}{2G(\sigma_m, \tau_i / \tau_i^*)} + \frac{\sigma_m}{K} \right\} dz; \tag{3.12}$$

где z – глубина, σ_z и σ_m – напряжения, определяемые функцией в зависимости от z .

Расчет суммарных деформаций основания при глубине котлована $h=20$ м на разных вертикалях был выполнен при следующих параметрах механических свойств грунтов $\varepsilon^* = 0.082$, $\alpha = 0.007$, $\nu = 0.26$, $G_o = 12000$ кПа, $\varphi = 29^\circ$ и $c = 12$ кПа. Для сравнения траекторий осадок были приняты следующие расстояния $f_1=6$ м, $f_2=2$ м (рисунки 3.2-3.3).

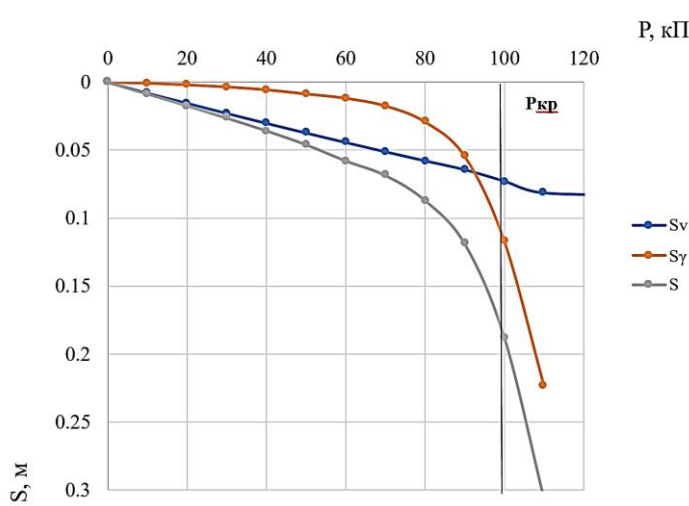


Рисунок 3.2. Кривые зависимости между $S_y(q)$, $S_v(q)$ и $S(q)$, рассчитанные с использованием уравнений (3.10 -3.12), и нагрузкой $P=q$ при расстоянии от ограждающей стены до распределенной нагрузки $f_1 = 6$ м

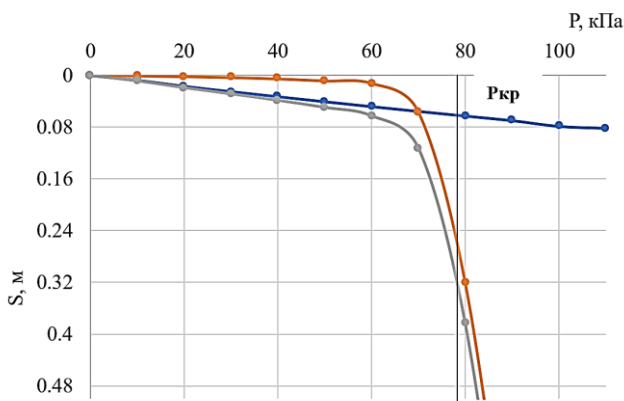


Рисунок 3.3. Кривые зависимости между $S_y(q)$, $S_v(q)$ и $S(q)$, рассчитанные с использованием уравнений (3.10 -3.12), и нагрузкой $P=q$ при расстоянии от ограждающей стены до распределенной нагрузки $f_2 = 2$ м

Сопоставляя суммарные осадки основания при различном расстоянии f от ограждающей стены до распределенной нагрузки, получаем совместный график зависимости $S(q) - q$ (рисунок 3.4)

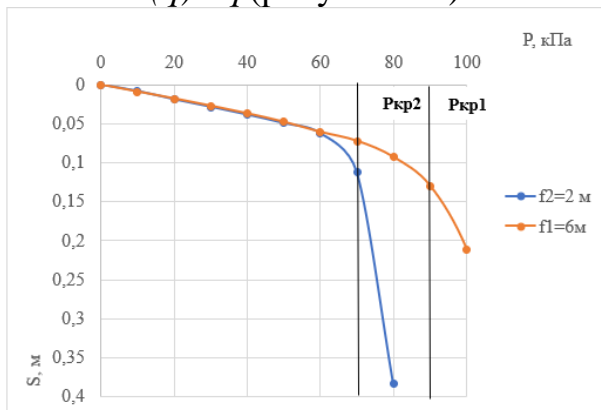


Рисунок 3.4. Кривые зависимости между суммарной осадкой $S(q)$ по центру фундамента, рассчитанные с использованием уравнений (3.10 -3.12), и нагрузкой $P=q$ при разных расстояниях $f_1=6$ м, $f_2=2$ м от ограждающей стены до распределенной нагрузки

По формулам (3.12 -3.14) были построены изолинии сдвиговых деформаций ε_γ , объемных деформаций ε_v и суммарных общих деформаций массива грунта. Результаты представлены на рисунках 3.5-3.7 при $f_l=6$ м.

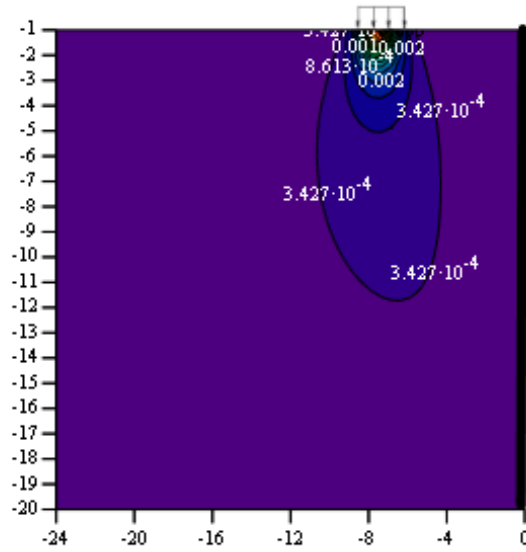


Рисунок 3.5. Сдвиговые деформации ε_γ , возникающие в массиве грунта, опирающемся на несжимаемое основание при действии распределенной нагрузки при $f_l=6$ м

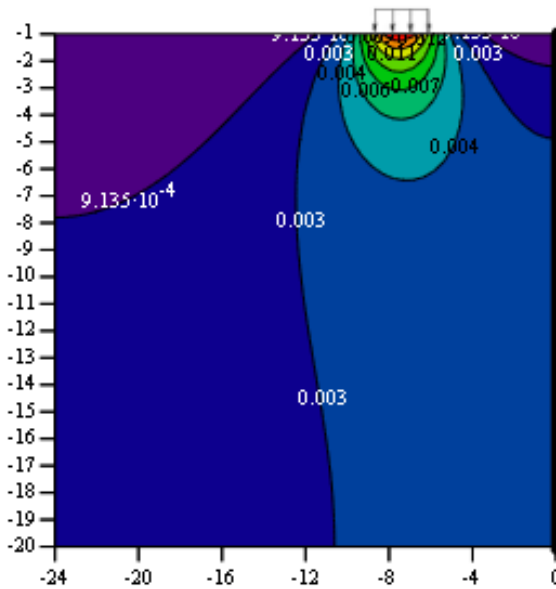


Рисунок 3.6. Объемные деформации ε_v , возникающие в массиве грунта, опирающемся на несжимаемое основание при действии распределенной нагрузки при $f_l=6$ м

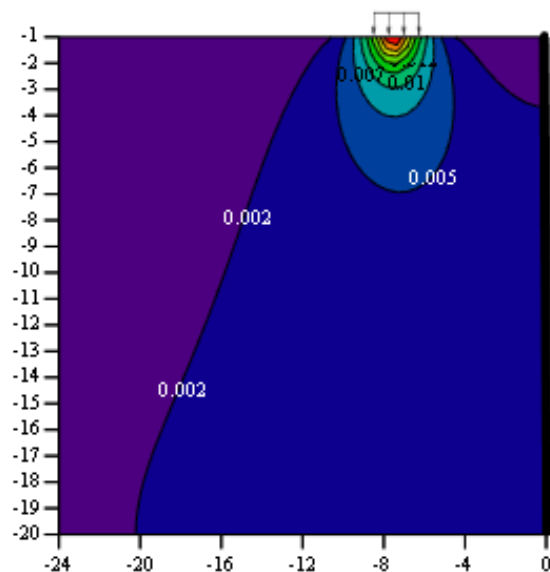


Рисунок 3.7. Суммарные общие деформации ε , возникающие в массиве грунта, опирающемся на несжимаемое основание при действии распределенной нагрузки при $f_l=6$ м

Также был проведен сопоставительный анализ результатов расчетов, определенных с использованием решения, основанном на формулах (3.10 -3.12) при использовании ПК MathCAD, с результатами расчета, полученными с использованием ПК Plaxis 2D. Расчеты в ПК Plaxis 2D выполнены с использованием линейно-упруго-идеальнопластической модели Мора – Кулона с приращением модуля деформации по глубине по линейному закону с аналогичными деформационными и прочностными параметрами как и для аналитического решения по формулам (3.10 -3.12).

Результаты расчета в ПК Plaxis 2D были получены при параметрах $q=100$ кПа, $f=6$ м, $b=2a=3$ м, $h=20$ м. Расчетная схема включает в себя однослойный грунтовой массив с боковым граничным условием, при котором $\varepsilon_x=0$, $\sigma_x \neq 0$, имитирующее абсолютно жесткое ограждение котлована при отсутствии горизонтальных перемещений. Нижняя граница расчетной модели зафиксирована в вертикальном и горизонтальном направлениях по умолчанию. Сопоставительный график «нагрузка – осадка» аналитического решения по формуле (3.16) и решения по ПК PLAXIS 2D для точки, находящейся в центре распределенной нагрузки на глубине 1 м представлен на рисунке 3.8.

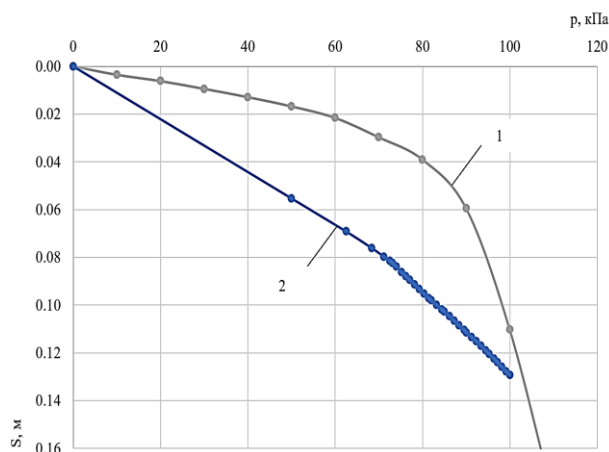


Рисунок 3.8. Сопоставительный график «нагрузка – осадка», определенный для слоя на глубине 1 м при: 1 – аналитическом решении по формуле (3.12); 2 – решению в ПК PLAXIS 2D.

В четвертой главе приведено решение задачи по определению осадки и несущей способности массива грунта, опирающегося на несжимаемое основание, при действии распределенной нагрузки вблизи борта котлована во времени с учетом вязко-упругопластических свойств грунтов. В качестве расчетной для определения нелинейных объемных деформаций с учетом реологических свойств грунта принята вязко-упругая модель Кельвина-Фойгта, в следующем виде:

$$\varepsilon_m(t) = \frac{\sigma_m}{K(\sigma_m)} \cdot \left(\frac{-K}{\eta_v} \cdot e^{\frac{-K}{\eta_v} t} \right) \quad (4.1)$$

где η_v – объемная вязкость, определяемая по формуле (4.2)

$$\eta_v = 2\eta_\gamma \frac{1+\nu_e}{1-2\nu_e} \quad (4.2)$$

Для определения нелинейных сдвиговых деформаций была использована реологическая модель, разработанная научным коллективом НОЦ «Геотехника».

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau^*}{\eta_\gamma(\sigma_m)} \left(\frac{e^{-\alpha\gamma}}{a} + \frac{e^{\beta\gamma}}{b} \right) \quad (4.3)$$

где τ и τ^* - действующее и предельное значения касательных напряжений на образец грунта;

$\dot{\gamma}(\gamma)$ – скорость угловой деформации, зависящая от деформации γ .

$\eta_\gamma(\sigma_m)$ – начальная сдвиговая вязкость грунта, которая в общем случае зависит от среднего напряжения σ_m .

α, β, a и b – параметры упрочнения (разупрочнения) глинистого грунта, которые определяются по результатам кинематического сдвига ($\dot{\gamma} = \text{const}$).

Сдвиговая вязкость η_γ определяется с помощью проведения экспериментальных исследований в приборе простого сдвига в кинематическом режиме нагружения при определенной скорости сдвигового перемещения.

Зависимости между напряжениями и скоростями деформаций были определены с помощью системы физических уравнений Генки, которая описывает скорость деформации ползучести как сумму объемных и сдвиговых скоростей деформаций ($\dot{\epsilon}_z = \dot{\epsilon}_\gamma + \dot{\epsilon}_v$) в следующем виде:

$$\dot{\epsilon}_z = \frac{\sigma_z - \sigma_m}{\eta_\gamma(\sigma_m)} \cdot \left(\frac{e^{-\alpha\epsilon_z}}{a} + \frac{e^{\beta\epsilon_z}}{b} \right) + \frac{\sigma_m}{K(\sigma_m)} \cdot \left(\frac{-K}{\eta_v} \cdot e^{\frac{-K}{\eta_v}} \right) \quad (4.4)$$

Осадка во времени и длительная устойчивость определялись при следующих параметрах краевой задачи: $q=100$ кПа, $f=6$ м, $b=2a=6$ м. Результаты построения графиков зависимости осадки от времени по формуле 4.4 получены для слоев сжимаемой толщи основания в виде суммы $\epsilon_{zi}(t) = \epsilon_{zi}(\gamma, t) + \epsilon_{zi}(\epsilon, t)$ (рисунок 4.1).

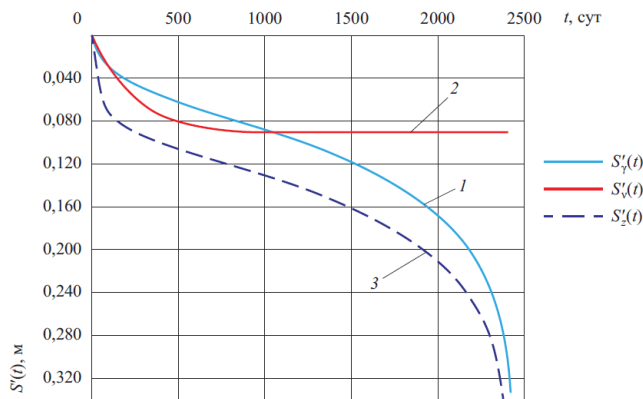


Рисунок 4.1. Осадки основания $S'(t) - t$: 1 – определенные по модели, разработанной научным коллективом НОЦ «Геотехника»; 2 – определенные по модели Кевина - Фойгта; 3 – суммарные деформации, определенные по формуле (4.6)

В настоящей работе также были построены графики зависимости $S' - t$ при разных нагрузках от фундамента p с графиком длительной устойчивости (рисунок 4.2). Значения нагрузок приняты следующие: $p_1 = 100$ кПа; $p_2 = 150$ кПа; $p_3 = 180$ кПа; $p_4 = 200$ кПа; $p_5 = 220$ кПа; $p_6 = 250$ кПа. Кривая длительного сопротивления грунтового массива была построена по точкам (a_1, \dots, a_6) , изображенным на рисунке 4.2, которые иллюстрируют интенсивное нарастание деформаций во времени.

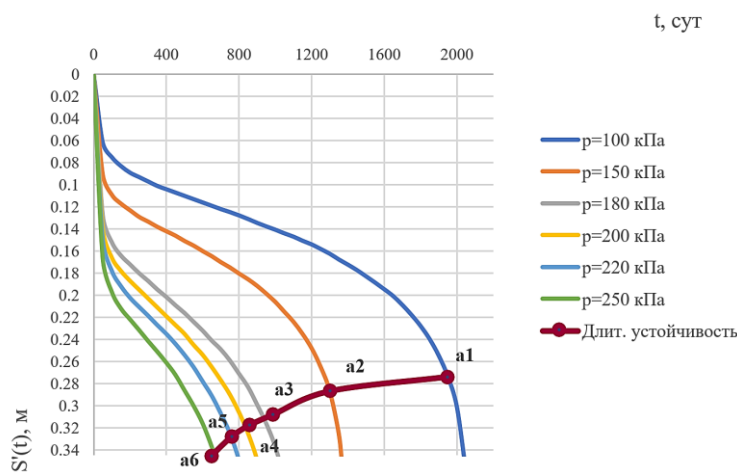


Рисунок 4.2. Суммарные осадки основания $S - t$ при различных нагрузках от фундамента p

Сравнив графики длительной устойчивости основания при разных расстояниях f от нагрузки до борта котлована (рисунок 4.3), можно сделать вывод о том, что по мере удаления распределенной нагрузки от борта котлована графики длительной устойчивости отличаются несущественно.

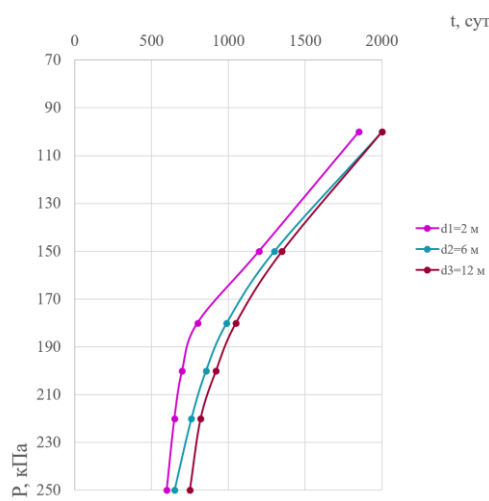


Рисунок 4.3. Сопоставительный график длительной устойчивости основания при различных нагрузках от фундамента p и расстояния от борта котлована до распределенной нагрузки f .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении диссертационной работы приведены итоги выполненных исследований. По результатам диссертационного исследования сделаны следующие выводы:

1. Изучены и проанализированы существующие теоретические и инженерные подходы к определению напряженно-деформированного состояния массивов грунтов при действии распределенной нагрузки вблизи борта котлована, осадок, а также длительной устойчивости оснований, выявлены и сформулированы их основные недостатки: отсутствие аналитических решений для определения компонент НДС грунтовых массивов при действии распределенной нагрузки вблизи борта котлована, позволяющих учитывать одновременно глубину котлована, расстояние от распределенной нагрузки до борта котлована, а также ее ширину и величину; несоответствие траекторий развития осадок между теоретическими прогнозами и экспериментальными исследованиями вследствие неучета упругопластического деформирования грунтов; использование в расчетах осадок постоянного модуля деформации, независящего от уровня напряжений; отсутствие расчетной модели по определению длительной устойчивости оснований массивов грунтов при действии распределенной нагрузки вблизи борта котлована во времени.

2. На основании сравнительного анализа полученного решения задачи о распределении напряжений в массиве грунта конечной ширины и толщины, опирающегося на несжимаемое основание, по методу тригонометрических рядов Рибьера-Файлона, задачи, основанной на решении Фламана, и ПК PLAXIS 2D показано, что реальной работе грунтовых оснований при действии нагрузки, в частности на расстоянии от борта котлована, наиболее близко соответствует расчетная модель, позволяющая учитывать ограниченность области деформирования по ширине и глубине.

3. Полученные напряжения на контакте грунтового массива и ограждения котлована показывают, что определяющими факторами напряженного состояния являются расстояние от бровки котлована до распределенной нагрузки (f , м), глубина котлована (h , м), величина нагрузки (q , кПа), ширина нагрузки ($b=2a$, м). При расположении распределенной нагрузки на глубине (d), данный фактор также оказывает существенное влияние на формирование НДС грунтового основания.

4. Рассмотрена расчетная упругопластическая модель, основанная на совместном применении моделей С.П. Тимошенко и С.С. Григоряна в составе определяющей системы физических уравнений Г. Генки. Отмечается, что данная модель позволяет учитывать изменение модуля сдвига G в зависимости от глубины и уровня напряжений, что в большей степени соответствует реальной работе грунтового массива под нагрузкой.

5. В условиях упругопластического поведения грунтового массива полученное аналитическое решение по формуле (3.12) позволяет определять критическую нагрузку на основание – $p_{кр}$, соответствующую предельному состоянию, и прогнозировать осадку и несущую способность грунтового основания в виде кривой осадка – нагрузка ($S - p$), имеющего траекторию с двойной кривизной. Установлено, что несущая способность грунтового массива при действии распределенной нагрузки вблизи борта котлована существенно зависит от расстояния.

6. С целью прогнозирования длительной осадки и устойчивости грунтового основания расположенных вблизи котлованов зданий и сооружений при консервации сооружаемой подземной части в котловане рассмотрена расчетная реологическая модель, основанная на совместном использовании вязкопластической модели, разработанной коллективом НОЦ «Геотехника» и упруговязкой модели Кельвина – Фойгта в составе определяющей системы физических уравнений Г. Генки, что позволяет прогнозировать осадку во времени, а также длительную устойчивость массивов грунтов.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Необходимо дальнейшее развитие метода расчета осадок и несущей способности оснований и фундаментов вблизи бортов котлованов, в том числе с учетом фактора времени на основании экспериментально-теоретических исследований. Это позволит совершенствовать методы количественной оценки НДС оснований, взаимодействующих с различными подземными конструкциями: фундаментами мелкого и глубокого заложения, ограждениями котлованов, конструкций тоннелей и инженерных коммуникаций.

Результаты теоретических исследований, выполненных в диссертационной работе, предлагается внедрить в практику инженерно-геотехнических изысканий,

научно-исследовательских работ, а также в качестве дополнительной научно-технической литературы.

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК:

1. Тер-Мартirosян З.Г., Ванина Ю.В. Напряженно-деформированное состояние грунтового массива в четверти плоскости под воздействием полосовой нагрузки // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 11. С. 1505–1512. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1505-1512.

2. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Ванина Ю.В. Осадка и несущая способность оснований и фундаментов вблизи вертикальной выемки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 4. С. 443–453. DOI:10.22227/1997-0935.2022.4.443-453.

3. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Ванина Ю.В. Длительная осадка и несущая способность оснований и фундаментов вблизи вертикальной выемки при разных параметрах вязкости грунта // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 12. С. 1664–1676. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1664-1676.

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и др.:

4. Ter-Martirosyan, Z.G. Stress-strain state of the soil mass under the uniformly distributed load action adjacent to a vertical excavation / Z.G. TerMartirosyan, I.N. Luzin, Yu. V. Vanina, A.Z. Ter-Martirosyan // IOP Conference Series: Material Science and Engineering. – 2021. Vol. 1083. –№012015/ – DOI 10.1088/1757-899X/1083/1/012015

5. Ter-Martirosyan, Z.G. Impact of a deep foundation on enclosing wall structure of excavation / Z.G. Ter-Martirosyan, Yu. V. Vanina // IOP Conference Series: Journal of Physics Conference Series. – 2021. Vol. 1928. – №012004/ – DOI 10.1088/1742-6596/1928/1/012004.

6. Ter-Martirosyan, Z.G. Mathematical Analysis for the Evaluation of Settlement and Load-Bearing Capacity of a Soil Base Adjacent to an Excavation Pit / Z.G. Ter-Martirosyan, A.Z. Ter-Martirosyan, Y. V. Vanina // Axioms. – 2022. Vol.11. –№ 353/ DOI 10.3390/axioms11080353.

7. Ter-Martirosyan, Z.G. Mathematical Computations of Long-Term Settlement and Bearing Capacity of Soil Bases and Foundations near Vertical Excavation Pits / Z.G. Ter-Martirosyan, A.Z. Ter-Martirosyan, Y. V. Vanina // Axioms. – 2022. Vol. 11. – № 679/ DOI 10.3390/axioms11120679

8. Ter-Martirosyan, Z. Interaction of Weighty Layer of Soil of Limited Thickness with Incompressible Base and Pit Fence When Exposed to Distributed Load Near It / Z. Ter-Martirosyan, A. Ter-Martirosyan, Y. Vanina // XV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2022”. INTERAGROMASH 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. Vol. 574. DOI 10.1007/978-3-031-21432-5_336

9. Ter-Martirosyan, A.Z. A Mathematical Analysis of the Stress Statement of the Soil Basis under Complex Loading near the Retaining Wall / A.Z. Ter-Martirosyan, Y. V. Vanina // Axioms. – 2023. Vol. 12. –№536/ DOI 10.3390/axioms12060536