

На правах рукописи



ЮАНЬ ЦЗИНВЭНЬ

**ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ В ВЫЕМКАХ И НАСЫПЯХ
ПРИ УСТРОЙСТВЕ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

2.1.8 Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов,
мостов и транспортных тоннелей

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Хабаровск–2024

Работа выполнена автором в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тихоокеанский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Горшков Николай Иванович

Официальные оппоненты: **Ярмолинский Владимир Аполенарьевич**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Строительство и эксплуатация
дорог» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-
дорожный государственный технический универси-
тет»

Сидляр Александр Владимирович
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
геомеханики ФГБУН «Институт горного дела
Дальневосточного отделения Российской академии
наук»

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образова-
тельное учреждение высшего образования «Дальне-
восточный федеральный университет»

Защита состоится «02» октября 2024 г. в 15-15 часов на заседании диссер-
тационного совета Д 44.2.001.02, созданного на базе федерального государствен-
ного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальне-
восточный государственный университет путей сообщения» по адресу: 680021, г.
Хабаровск, ул. Серышева, д. 47, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Дальнево-
сточный государственный университет путей сообщения» и на сайте
<https://dvgups.ru/>.

Автореферат разослан «17» июня 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Каликина Татьяна Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Возникающие при строительстве грунтовых сооружений естественные проблемы, начинающиеся с образования трещин, постепенного формирования оползневых тел и заканчивающиеся потерей их устойчивости, роль которых в оценке устойчивости неясна, делают это исследование весьма актуальным.

Исследование заключается в использовании современных возможностей численных методов расчета и совершенствовании на этой основе методики расчетно-теоретического прогноза изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) и устойчивости транспортных грунтовых сооружений выемок и насыпей, в изучении возникновения и развития оползневых тел в бортах (откосах).

Степень разработанности темы исследования. Разработка методики расчетно-теоретического прогноза изменения напряженно-деформированного состояния и устойчивости транспортных грунтовых сооружений выемок и насыпей предполагает изучение опыта исследований НДС таких транспортных сооружений.

Исследованием устойчивости склонов и откосов природных и искусственных грунтовых сооружений, результаты которых необходимо учитывать в работе, занимались ученые: Д. М. Ахпателов, А. Бишоп, А. Н. Богомолов, А. Н. Власов, Л. К. Гинзбург, М. Н. Гольдштейн, Н. И. Горшков, А. М. Демин, Э. М. Добров, А. Г. Дорфман, Е. П. Емельянова, Ю. К. Зарецкий, О. Зенкевич, В. М. Казарновский, Э. В. Костерин, Г. Крей, Н. Н. Маслов, С. И. Маций, М. Г. Мнушкин, Н. Моргенштерн, Х. Г. Паулос, Р. Пек, Г. П. Постоев, В. Прайс, В. В. Семенов, В. В. Соколовский, Е. Спенсер, Д. Тейлор, З. Г. Тер-Мартirosян, К. Терцаги, С. Б. Ухов, И. В. Федоров, В. Г. Федоровский, В. Феллениус, Г. Л. Фисенко, В. А. Флорин, И. К. Фоменко, В. К. Цветков, Н. А. Цытович, Г. П. Чеботарев, Л. Т. Чен, Р. Р. Чугаев, К. Ш. Шадунц, Д. М. Шапиро, Г. М. Шахунянц, Л. Шукле, Н. Янбу и др.

Целью диссертационной работы является исследование изменения напряженно-деформированного состояния и устойчивости транспортных грунтовых сооружений в виде однородных выемок и насыпей в изучении возникновения и развития оползневых тел и сопутствующих им явлений-трещин, вихрей и т. п.

Для достижения цели были поставлены **следующие задачи:**

1. Выполнение анализа исследования вопросов НДС и устойчивости систем «грунтовые сооружения – геосреда».

2. Выполнение сравнительного анализа НДС систем «грунтовое сооружение – геосреда» и устойчивости при действии разных факторов – технологии устройства, геометрических размеров и форм, механических свойств грунтов, результатов проведения полевых опытов.

3. Изучение вопросов, связанных с образованием оползневых тел и их элементов в выемках и насыпях, и их производных – «закольных» и иных трещин,

слабоизученного явления «круга вращений» при устройстве грунтовых сооружений.

Объектом исследования являются однородные грунтовые транспортные сооружения в виде выемок, насыпей и их производных.

Предметом исследования является оценка напряженно-деформированного состояния и устойчивости в системах «грунтовое сооружение – геосреда».

Научная новизна работы состоит:

1. В создании графических зависимостей на основе инвариантов тензора напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ε_{ij} , позволяющих оценить НДС и устойчивость траншей с вертикальными откосами, бортов выемок и откосов насыпей на основе решения упругопластических задач.

2. В выяснении механизма образования оползневых тел на основе зон «пластичности», «закольных» и иных трещин, возникающих в верхней части грунтовых сооружений при устройстве выемок и насыпей.

3. В моделировании и оценке методом конечных элементов слабоизученного явления «круга вращений» в грунтовых массивах при устройстве выемок и насыпей.

Достоверность результатов исследований, выводов и рекомендаций диссертационной работы обусловлены: применением математических методов механики сплошной среды и прикладной геомеханики в строительстве, в использовании основных математических уравнений теории упругости и пластичности; сравнением полученных результатов с известными результатами решения прикладных задач, выполненных другими авторами; сравнением полученных результатов с известными результатами экспериментальных исследований по изучению условий взаимодействия транспортных сооружений и конструкций с массивами грунтов.

Область исследования: диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей, пункту 14 – разработка новых и совершенствование существующих методов и средств математического и физического моделирования работы конструкций, технологических процессов, организации и оперативного управления строительным производством, режимов эксплуатации и оценки технических и экологических рисков при строительстве, эксплуатации и реконструкции транспортных сооружений, их элементов, объектов и производств.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в решении прикладных задач для грунтовых транспортных сооружений, устроенных в выемках, насыпях и их производных; исследовании НДС и обеспечении устойчивости при их проектировании и эксплуатации; развитии программного обеспечения на основе численных методов в практике проектирования сооружений.

Методология и методы исследований. Для достижения поставленной цели в работе использовались математические методы исследования, реализуемые в алгоритмах метода конечных элементов и воплощенные в развитии сертифицированной программы GenIDE32.

На защиту выносятся:

1. Результаты сравнительного исследования НДС и устойчивости системы «сооружение – геосреда» (траншеи с вертикальными откосами) с результатами известных полевых опытов при устройстве траншей;

2. Результаты сравнительного исследования НДС и устойчивости системы «сооружение – геосреда» (выемки и насыпи) в процессе устройства этих сооружений с учетом влияния геометрических форм, технологии возведения сооружений и механических свойств геоматериалов.

3. Результаты изучения образования и развития оползневых тел, в том числе их элементов в виде «закольных» трещин и явления «круга вращений» в грунтовых массивах при устройстве выемок и насыпей.

Степень достоверности основных научных результатов определяется: применением математических методов механики сплошной среды и прикладной геомеханики в использовании основных математических уравнений; сравнением полученных результатов с известными результатами решения прикладных задач, выполненных другими авторами; сравнением полученных результатов с известными результатами экспериментальных исследований взаимодействия транспортных сооружений и конструкций с массивами грунтов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы представлялись и обсуждались на следующих конференциях: международный геотехнический симпозиум «Геотехника строительства промышленных и транспортных сооружений Азиатско-Тихоокеанского региона» (г. Южно-Сахалинск, 2018 г.). А также публикации в международном сборнике научных трудов «Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения» ФГБОУ ВО ТОГУ (2016–2019 гг.).

Личный вклад автора. В диссертации представлены результаты исследования, полученные автором, которые включают в себя:

- постановку задачи исследования;
- анализ литературных источников;
- разработку методик и проведение численных исследований;
- обработку полученных результатов и их обобщение;
- выработку практических рекомендаций.

Публикации. Основные результаты исследовательской работы представлены в восьми научных публикациях, две из которых – в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Материал изложен на 144 страницах, содержит 18 таблиц, 79 рисунков и список литературы, включающий 138 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются

цели и задачи, осуществляется выбор предмета и объекта исследования. Формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор и анализ существующих методов расчетов НДС и устойчивости насыпей и выемок, в том числе развития теории расчетов, обычно используемой при анализе откосов (склонов), описания вида оползневых тел и трещин и других проблем с помощью современных расчетных программ, а также основных факторов, которые необходимо учитывать в задачах устойчивости откосов (склонов).

В оценке устойчивости грунтовых транспортных сооружений, выемок и насыпей до сих пор используются известные варианты инженерных методов расчета (плоская задача), реализованные в современных программах: К. Терцаги, Н. Н. Маслова, Г. М. Шахунянца, А. Бишоп, Г. Крея, Н. Янбу и др.

Как экспериментальные средства, так и современные расчетные программы могут лучше моделировать появление оползней в откосах (склонах) или представить происхождение трещин отрыва и гибко учитывать влияние некоторых факторов на них. Но как с помощью этих средств совместить одновременно анализ деформаций откосов (выемки и насыпи) и изучение НДС? Это важный вопрос.

В последнее время возник интерес к другим малоизученным явлениям, которые происходят в оползневых массивах грунтов, подкрепленных ограждениями, например, «кругам вращения» или завихрениям вокруг какой-то точки. Такие явления проявляют себя при выводе результатов расчетов в виде поля вектора смещений. Как, почему и где они возникают, а также куда движутся и исчезают и как возможно они влияют на НДС и устойчивость рассматриваемых систем, – это вопрос для исследований.

Для решения поставленных прикладных задач используется программа метода конечных элементов GenIDE32, математический аппарат геомеханики и других теорий для проведения соответствующих исследований НДС и устойчивости при устройстве насыпей и выемок.

Во второй главе диссертации представлены основные уравнения, методика расчета, анализа и оценки напряженно-деформированного состояния элементов модели системы «сооружение – геосреда».

В третьей главе выполнены расчеты НДС выемок с крутыми бортами.

Первой задачей является расчетная схема системы «траншея – основание» для численного решения такой задачи, созданная под данные объекта № 3, участка II из монографии проф. Э. В. Костерина (рисунок 1).

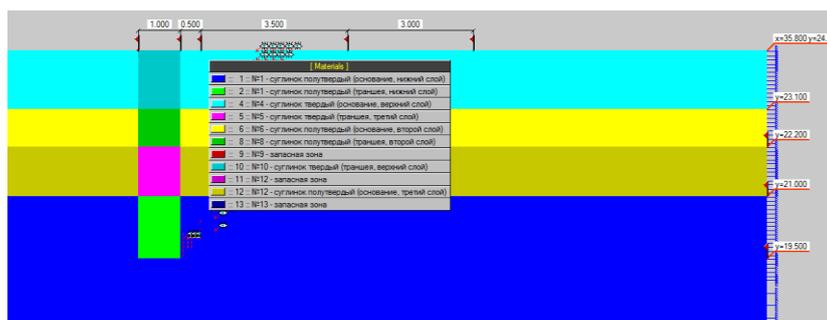


Рисунок 1 – Фрагмент расчетной схемы системы «траншея – основание»

(данные объекта № 3, участка II из монографии Э. В. Костерина)

На этом участке была устроена траншея с вертикальными стенками, глубиной $d=5,00$ м и шириной $b=1,00$ м. За правой бровкой откоса траншеи, на расстоянии 0,50 м от неё, на поверхности массива грунтов устраивался отвал треугольного поперечного сечения из грунта траншеи. Формула ширины треугольного отвала 3,50x3,00 м. Траншея устраивалась в массиве суглинков от твердой до полутвердой консистенции. Расчетные значения деформационных и прочностных параметров грунтов, полученные в опытах проф. Э. В. Костериним, приведены в таблице 1.

В расчетах НДС использовалась нелинейная модель грунта на основе ассоциированного закона пластического течения с условием текучести по Кулону-Мору.

Таблица 1

Расчетные значения параметров элементов системы «траншея – основание»

Наименование материала или грунта	γ , МН/м ³	E , МПа	ν	φ , град	c , МПа
№ 1 – суглинок твердый (основание, первый слой)	0,0177	15	0,35	33	0,0238
№ 2 – суглинок полутвердый (основание, второй слой)	0,0174	15	0,37	28	0,0150
№ 3 – суглинок полутвердый (основание, третий слой)	0,0171	10	0,37	31	0,0202
№ 4 – суглинок полутвердый (основание, четвертый слой)	0,0187	10	0,37	33	0,0191

Общая схема решения задачи по определению НДС элементов системы «сооружение – геосреда» имеет вид:

- определение начального НДС природного массива грунтов;
- последовательное моделирование экскавации грунта из траншеи (10 этапов при мощности каждого слоя экскавации 0,50 м);
- последовательное, после каждого этапа экскавации, приложение поверхностной, распределенной по треугольнику нагрузки, моделирующей грунт треугольного отвала (ширина 3,50x3,00 м, удельный вес грунта $\gamma=0,0178$ МН/м³, максимальное значение распределенной нагрузки на каждом этапе $q=0,00274$ МН/м).

Вид уровней значений горизонтальной компоненты вектора смещений u_x (м, между этапами моделирования) при полной глубине траншеи в 5,00 м показан на рисунке 2. Там же показаны зоны «пластичности» и линия скольжения с $k_{st}[\dots]_{min}$. Результаты оценки устойчивости откоса: $k_{st}[Cray]_{min}=1,01 > [k_{st}]=1,00$.

Наблюдения проф. Э. В. Костерина показали, что перед потерей устойчивости откоса траншеи, при её глубине в 5,00 м, произошёл вывал грунта из его нижней части с образованием так называемых ниш.

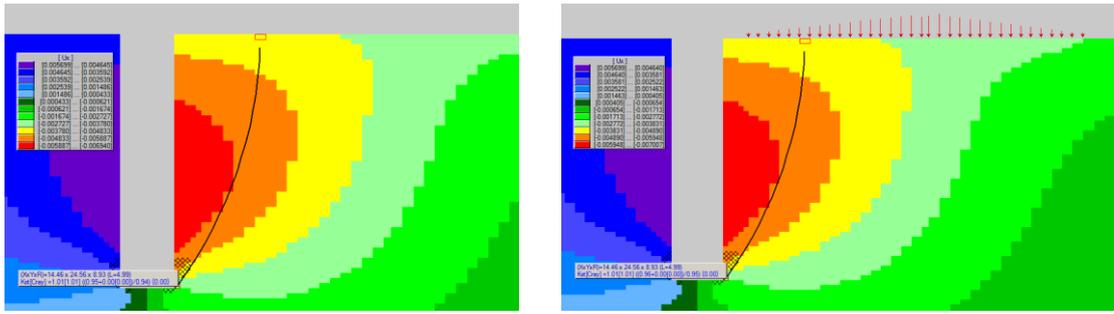


Рисунок 2 – Зоны «пластичности» (заштрихованные КЭ) и уровни значений горизонтальной компоненты вектора смещений u_x (м, между этапами моделирования) на последнем этапе моделирования экскавации (слева) и приложения поверхностной нагрузки в месте отвала (справа); условие устойчивости: $k_{st}[Cray]_{min}=1,01 > [k_{st}]=1,00$

На местоположение этих ниш указывают результаты выполненных расчетов, это зоны «пластичности» в окрестности нижних углов траншеи. Последними в этой серии расчетов были расчеты, моделирующие образование ниш, размером 0,20x0,6 м, в месте которых в КЭ зон «пластичности» ставилось условие «экскавация». Результаты расчетов показаны на рисунке 3.

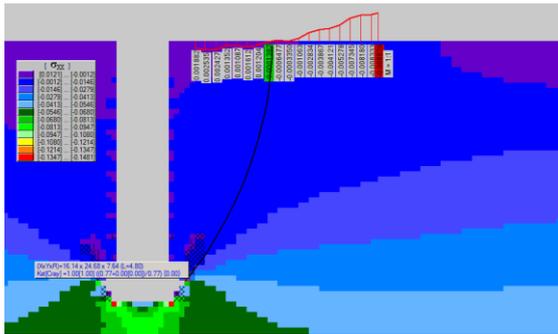


Рисунок 3 – Зоны «пластичности» на этапе моделирования возникновения ниш и уровни значений: горизонтальных напряжений σ_{xx} (МПа); условие устойчивости: $k_{st}[Cray]_{min}=1,00 \approx [k_{st}]=1,00$

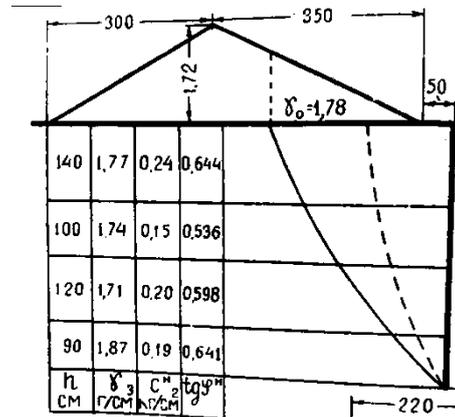


Рисунок 4 – Расчетные сечения на опытных траншеях (штрихпунктирная линия, реальная линия скольжения, сплошная расчетная, полученная по вычислению проф. Э. В. Костерина)

Важным результатом расчетов является близкое совпадение местоположения расчетной поверхности скольжения с $k_{st}[...]_{min}$ с реальной поверхностью, показанной на рисунках расчетных схем рассматриваемой работы профессора Э. В. Костерина (рисунок 4). К этому можно добавить, что положение поверхностей скольжения с $k_{st}[...]_{min}$, полученные автором Э. В. Костериным на основе методов теории предельного состояния (вариант К. Терцаги), отличается от их реального расположения, их начало сдвигается к центру отвала.

Начало поверхностей скольжения с $k_{st}[\dots]_{min}$ совпадает с указанными выше возможными местами образования вертикальных «закольных» трещин (см. рисунок 3).

Результаты выполненного моделирования показывают, что зоны предельного состояния или «пластичности» реализуются только в нижних частях массива грунта, в котором устраивается траншея, где на практике происходят вывалы грунта. При моделировании вывалов зоны «пластичности» увеличиваются в размерах в направлении поверхности массива.

Для анализа и оценки НДС в точках массива грунтов можно использовать графики траекторий изменения напряженно-деформированного состояния в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ε_{ij} (рисунок 5) и графики кругов Мора (рисунок 6).

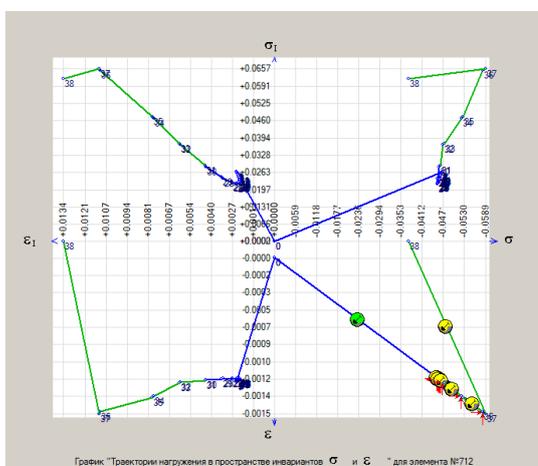


Рисунок 5 – Графики траекторий в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ε_{ij} (в КЭ зон «пластичности», в окрестности углов траншеи)

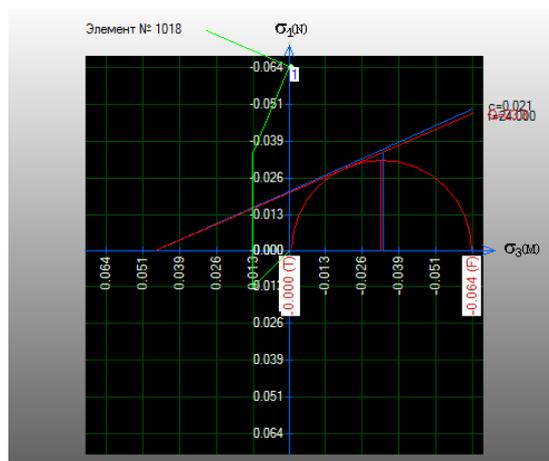


Рисунок 6 – График кругов Мора для КЭ, расположенных на линиях скольжения с $k_{st}[\dots]_{min}$

Рассматривая первые графики в КЭ зон «пластичности» можно увидеть, что в предельном состоянии меняются траектории нагружения в пространстве величин $\sigma_i - \sigma$ (интенсивности нормальных напряжений – средние нормальные напряжения). В пространстве величин $\sigma_i - \varepsilon_i$ (интенсивности нормальных напряжений – интенсивности относительных деформаций или графики деформаций формоизменения) появляются площадки сдвига и видна дилатансия (расширение грунта) в пространстве величин $\sigma - \varepsilon$ (средние нормальные напряжения – средние относительные деформации или графики деформаций объема) (см. рисунок 5).

Вторые графики, выведенные для КЭ, расположенных на линиях скольжения с $k_{st}[\dots]_{min}$, показывают, что напряженное состояние в тех местах близко к предельному. На это указывает и круг Мора, построенный на значениях главных напряжений в таких КЭ, где он практически касается следа предельной поверхности в плоскости главных напряжений (см. рисунок 6).

Выводы по исследовательской задаче № 1: результаты расчетов НДС и устойчивости систем «траншея – основание» подтверждают сначала образование зон «пластичности» в окрестности нижних углов траншеи, затем вывал этого грунта и наконец, обрушение откоса. Последнее подтверждается выполненными расчетами устойчивости, а именно, найденной этим расчетом поверхности скольжения при $k_{st}[\dots]_{min}$.

В исследовательской задаче № 2 представлены результаты расчетов НДС и устойчивости систем «траншея – основание» с использованием параметров прочности и деформируемости грунтов из нормативного документа СП 22.13330.2016.

Цель расчетов – выяснить места возникновения и развития растягивающих напряжений и зон «пластичности», а также оценить устойчивость (определить предельную глубину траншей d_u при $k_{st} \approx 1,00 \pm 0,02$) систем «траншея – геосреда» для разных грунтов, дать возможность проектировщикам в первом приближении задавать глубину траншей.

В качестве значений параметров прочности и деформируемости глинистых (аллювиальных) грунтов использовались их нормативные значения, представленные в таблицах А.2 и А.3 (приложение А) в нормативном документе СП 22.13330.2016. Расчеты для сравнения выполнялись для двух видов грунта, супесей и глин.

Расчеты выполнялись для следующих вариантов моделирования системы «траншея – основание»: 1) послойная экскавация грунта из траншеи (отвал устраивается поэтапно) при $b=1$ м, 2) разовая экскавация грунта из траншеи с разовым устройством отвала на поверхности, 3) уже устроенная траншея с отвалом на поверхности.

Ширина понизу симметричного относительно своей оси треугольного отвала из опытов профессора Э. В. Костерина равна: $B=5 \dots 6b$, где b – ширина траншеи.

Сделаны результаты расчетов для супесей и для глин. Все результаты исследования НДС системы «траншея – геосреда» МКЭ для однородных супесей и глин показывают, что наиболее результативным является расчет с учетом технологии её устройства.

Выяснилось, что используемые методы моделирования сооружения, анализа НДС системы, методы расчета оценки устойчивости откосов можно применять в расчетах систем из однородных грунтов – супесей и глин.

Четвертая глава диссертации описывает особенности НДС и устойчивости грунтовых массивов при устройстве системы «выемка – геосреда».

Целью исследования также является изучение особенностей изменения НДС и устойчивости однородных грунтовых массивов бортов выемки с разными их геометрическими размерами (заложение бортов) и значениями параметров грунтов – деформационными и прочностными.

В начале исследования на прикладных задачах были выполнены поисковые расчеты для ответа на вопрос: «Где возникают вихри?». Анализ результатов решения простых задач, связанных с послойным моделированием устройства выемок, насыпей, в том числе с подкреплением их откосами, показал, что вихри об-

разуются там, где наблюдаются движения элементов сооружения, например, поверхностей или конструкций (ограждения) в противоположных направлениях. В выемках так смещаются горизонтальные поверхности бортов при экскавации из неё грунта. В вертикальных ограждениях их верх и низ смещаются в противоположных направлениях, между которыми и образуются вихри. Собственно, на границе смены направлений движения, на некоторой глубине или в створе рассмотренных линий и возникают вихри.

В расчетах НДС используется нелинейная модель грунта на основе ассоциированного закона пластического течения с условием текучести по Кулону-Мору.

В качестве расчетных геомеханических моделей в исследовательских задачах используются 3 схемы выемок с заложениями их бортов: $1:m=1:1$, $1:m=1:2$ и $1:m=1:0,5$. Толщина слоев экскавации 1,10 м и 2,20 м. Значения параметров грунта однородной расчетной области равны (вариант № 1): $\gamma=0,0207$ МН/м³, $E=45$ МПа, $\nu=0,39$, $\varphi = 22$ град., $c=0,015$ МПа. Для других вариантов примеров значения параметров равны (при $\gamma=\text{const}$, $\nu=\text{const}$): варианты № 2 ($c=0,02$ МПа и $E=45$ МПа при $\varphi=17^\circ$ и 22°), варианты № 3 ($\varphi=22^\circ$ и $E=45$ МПа при $c=0,02$, $0,015$ и $0,01$ МПа).

В 1-й исследовательской задаче используется основной вариант расчетной схемы системы «выемка – геосреда» с заложением бортов $1:m=1:1$ и значениями параметров грунта по варианту № 1 (рисунок 7).

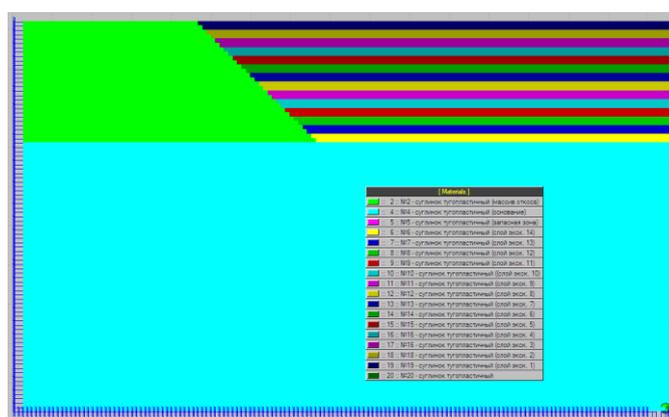


Рисунок 7 – Расчетная схема модели системы «выемка – геосреда» с заложением бортов $1:m=1:1$

Размеры расчетной области выбраны из условий малости влияния граничных условий по вектору смещений (закрепления) на численные результаты решения.

Но, как выяснилось в результате расчетов, граничные условия по вектору смещений (закрепления) – вертикальная граница слева, также влияют на время (этап экскавации) и место появления «кругов вращения». Расстояние от бровки выемки до этой границы (ширина борта поверху) должно быть более полутора глубин выемки.

На рисунке 8 показан путь движения слева направо центров вращения 8 вихрей1 в виде флажков в узлах и аналогичных 12 центров вихрей2, показанных в виде отметок узлов по координате Y.

Результатами процесса моделирования экскавации грунта из выемки подтверждено появление вихрей смещений или «кругов вращения», которые становятся видны при выводе поля вектора смещений «между этапами экскавации», назовем это вихри1 и «от начального НДС», это вихри2 (рисунок 8 и 9). При выводе поля вектора смещений «абсолютного» вихри не видны.

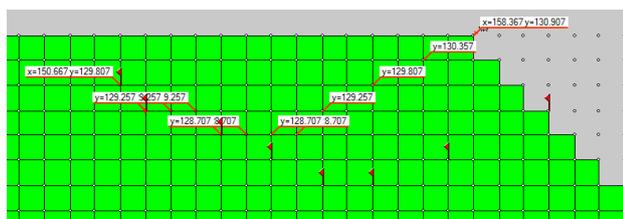


Рисунок 8 – Результаты расчета в виде траекторий движения узлов с центрами вращений вихрей1 (флажки) и вихрей2 (координаты по Y) для выемки с заложением бортов 1:m=1:1

Первые вихри1 и вихрь2 появляются в одном месте после моделирования 1-го этапа экскавации грунта из выемки (рисунок 9, а). Далее, в процессе моделирования экскавации грунта из выемки центры вращения вихрей1 и вихрей2 перемещаются слева направо к поверхностям борта выемки, всегда оставаясь на уровне или выше некоторого предела по глубине. Выход последнего вихря1 на негоризонтальную поверхность борта произошел между 7-м и 8-м этапами экскавации (рисунок 9, б). То же произошло при выводе поля вектора смещений «от начального НДС» для вихря2 после 13-го этапа экскавации (рисунок 9, г).

Для основного варианта расчета № 1 максимальная глубина расположения центров вихрей1 равна 3,30 м, для вихрей2 – 2,20 м (см. рисунок 8). Отметим, что значения предельной глубины центров вращения для вихрей2 сопоставимы со значением критической глубины трещины «отрыва», вычисленной по известной формуле: $h_{cr} = h_{90} = (2c/\gamma) \cdot \text{tg}(45^\circ + \varphi/2) = 2,15$ м.

Для всех вариантов расчетов с разными значениями параметров прочности, пути движения центров вихрей подобны, а значения глубин их расположения зависят, как и в формуле h_{cr} , от параметров входящих в неё и текущих геометрических размеров выемки.

Зоны «пластичности» или предельного состояния (одноосное сжатие со сдвигом и наоборот – заштрихованные под углом крестообразно конечные элементы) появились в подножие борта выемки на 4-м этапе экскавации. Далее, по мере углубления выемки, они расширились вверх и влево внутри борта выемки и немного вниз от её текущего подножия. После 14-го этапа экскавации между следами центров вихрей1 и вихрей2 возникли (см. рисунок 9, в) и далее развивались вверх и влево к горизонтальной поверхности борта зоны «пластичности» с растяжением (заштрихованные вертикально или горизонтально, а также вертикально и горизонтально конечные элементы) (см. рисунок 9, г).

На том же 12-м этапе грунт борта выемки перешел в предельное состояние по устойчивости (см. рисунок 9, в). Все линии скольжения с $k_{st \min}$ (вариант «предельных касательных напряжений»: $k_{st} = \tau_u/\tau$) практически находятся в зоне предельного состояния. В верхней части линии пересекают конечные элементы (красная окраска), в которых все главные напряжения равны нулю: $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$.

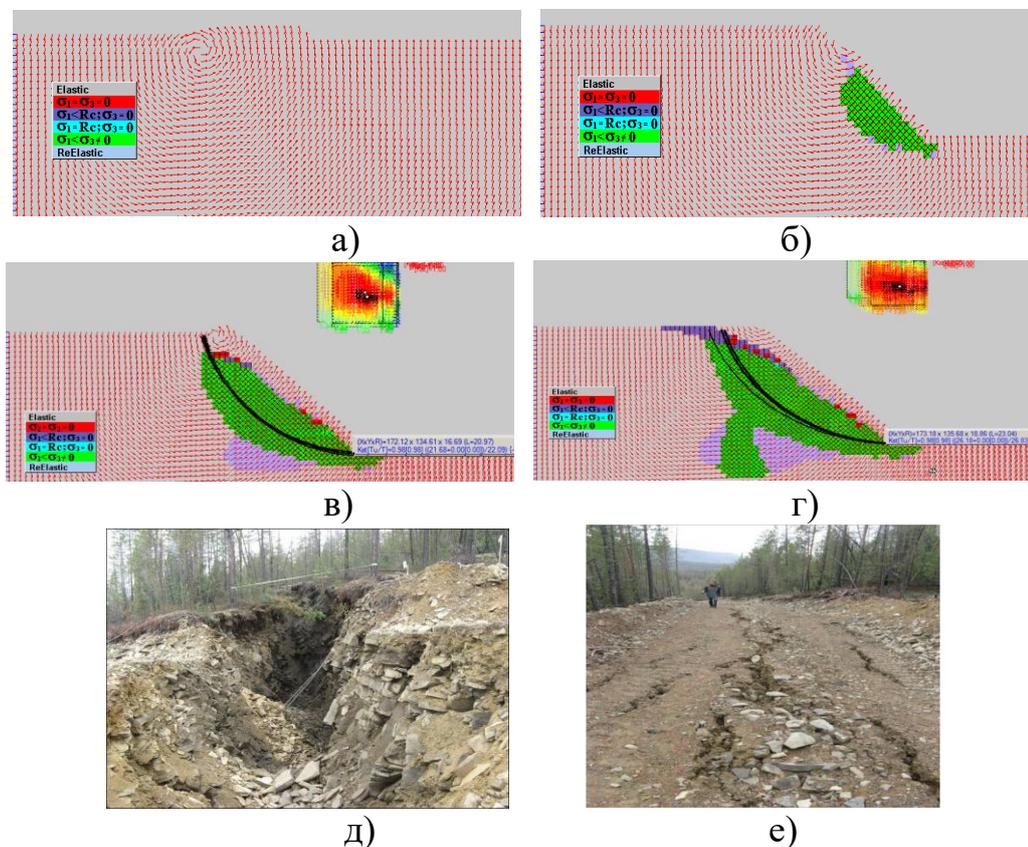


Рисунок 9 – Поле вектора смещений для системы «выемка – геосреда»: а) – возникновение 1-го вихря1 и вихря2 (на 1-м этапе экскавации); б) – зоны «пластичности» (одноосное сжатие со сдвигом и наоборот), выход вихря1 на поверхность борта (между 7-м и 8-м этапами экскавации); в) – вихрь2 у поверхности борта, появление зон «пластичности» (растяжение) на 12-м этапе, $k_{st \min} \approx 0,98$; г) – выход вихря2 к бровке борта (на 13-м этапе, $k_{st \min} \approx 0,98$); д) – фото С. М. Ждановой борта железнодорожной выемки с квазивихревым сложением глыбового грунта (см. рисунок 14, в); е) – трещины на поверхности обездной грунтовой дороги за бровкой глубокой выемки, расположенной на 451-452 км федеральной автодороги «Лена»

После последнего 14-го этапа экскавации ($d=15,40$ м) в борте выемки полностью прорисовались контуры оползневого тела (рисунок 10). Этот результат расчетов хорошо виден на расчетной схеме с уровнями значений средней относительной деформации ε . Линии скольжения с $k_{st \min} = 0,98$ проходят рядом с нижней границей оползневого тела, разделяющей зоны грунта со значениями $\varepsilon \leq 0$ и $\varepsilon > 0$.

Для последнего 14-го этапа экскавации, когда полностью прорисовались контуры оползневого тела (рисунок 11), показаны в КЭ (снизу-вверх по линии скольжения, от подножия) графики траекторий нагружения в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ε_{ij} (рисунок 11).

В отличие от систем «насыпь – геосреда» (глава 5), траектории нагружения грунтов борта выемки в пространстве $\sigma_i - \sigma$, в КЭ линий скольжения с $k_{st\ min}$, являются более сложными по конфигурации (рисунок 11).

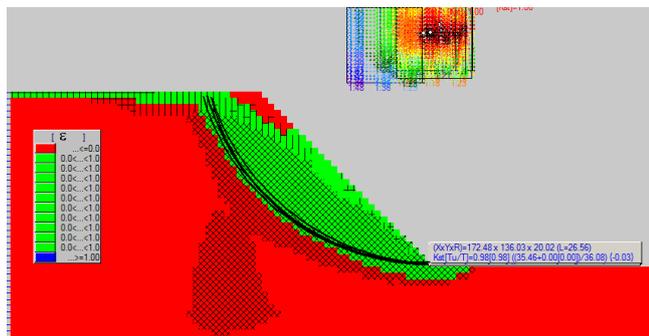


Рисунок 10 – Результаты расчета после 14-го этапа экскавации – зоны «пластичности» и уровни значений шарового инварианта тензора относительных деформаций ε : $\varepsilon \leq 0$. – красная или более темная окраска; $\varepsilon > 0$. – зеленая или более светлая окраска

Можно выделить три варианта траекторий нагружения в пространстве инвариантов $\sigma_i - \sigma$. В первом случае в зонах «пластичности» сжатия (см. рисунок 11, а и б), во втором – в зонах «пластичности» растяжение (нижняя часть), в третьем – в зонах «пластичности» растяжение (верхняя часть).

В КЭ, расположенном в подножии борта на выходе линии скольжения из него, траектории в пространстве $\sigma_i - \sigma$ изменялись следующим образом (см. рисунок 11, а): на 7-м этапе начинается смена траектории «раздавливания» (разгрузка) на траекторию «удлинения» (нагружение по девиатору σ_i и разгрузка по шаровому инварианту σ); на последнем этапе смена на траекторию «простого сдвига» с появлением длинной площадки «сдвига» в пространстве девиаторов $\sigma_i - \varepsilon_i$ (квадрант деформации формоизменения), где до 11-го этапа происходила разгрузка по σ_i , а после него нагрузка с выходом в площадку сдвига.

В пространстве $\sigma - \varepsilon$ (квадрант деформации объема) до 14-го этапа происходит упругая разгрузка по σ и ε , а на последнем участке при $\sigma = const$. На расчетной схеме на 7-м этапе уже не наблюдались вихри¹, а на 12-м в местах центров вихрей² появились зоны «пластичности» (растяжения) и на 13-м выход вихрей² на бровку борта выемки. Вид увеличенных конечных участков графиков всех траекторий нагружения указывает на окончание процесса формирования оползневого тела.

На рисунке 11, б и в изображены аналогичные графики, характерные для КЭ, расположенных на линии скольжения ниже зон «пластичности» (растяжения) и выше подножия борта, в зонах «пластичности» (сжатия). На всех графиках в пространстве $\sigma_i - \sigma$ есть последний участок с разгрузкой по σ_i и σ . Появление этого участка на графиках на последнем этапе моделирования выемки указывает на выход грунта борта в предельное состояние по устойчивости.

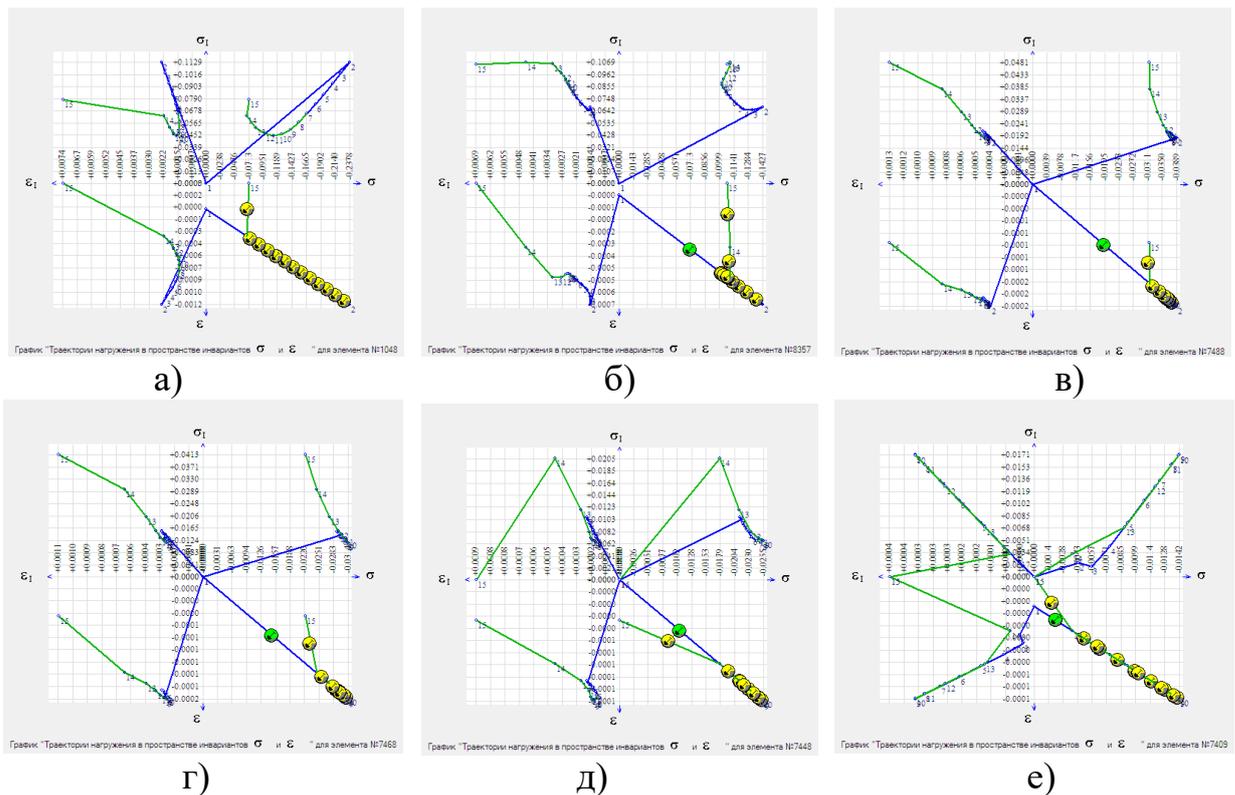


Рисунок 11 – Результаты расчета (выемка – геосреда, $E_{ep}=45$ МПа), графики траекторий нагружения в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} (МПа) и относительных деформаций ε_{ij} : а) – для КЭ в подножие борта; б) – для КЭ, расположенных на линии скольжения выше подножия в зонах «пластичности» сжатия; в) – для КЭ в зонах «пластичности» растяжения (нижняя часть); г) – для КЭ в зоне центров вихрей (над зонами «пластичности» сжатия); д) – для КЭ в вершине трещины; е) – для КЭ сразу под поверхностью (в начале линии скольжения)

Для КЭ, расположенных в начале линии скольжения и в зоне движения центров вихрей, характерны другие графики траекторий, графики с язычковыми изгибами (рисунок 11, г). Они характерны для КЭ, расположенных в зоне «пластичности» растяжения, между центрами вихрей1 и вихрей2. График на рисунке 11, д заканчивается выходом величин на значение ноль, т. е. в этих местах образуются трещины. В самом начале линии скольжения графики имеют вид рисунка 11, е. Для таких графиков, после 8-го этапа экскавации, после выхода вихря1 на поверхность, характерны линейные с упругой разгрузкой траектории по всем осям.

Еще представляют интерес графики в узлах на бровке борта выемки и на левой вертикальной границе расчетной схемы в уровне её подножия (рисунок 12). Первый график слева имеет гистерезисный вид. Если вывести аналогичный график для узла подножия выемки, то он будет без гистерезиса. Эти графики подтверждают наблюдение о движении верхней и нижней частей возникающего оползневого тела в разные стороны.

График на рисунке 12, б может служить ещё одним критерием окончания процесса образования оползневого тела.

При достижении грунтом борта предельного состояния по устойчивости горизонтальные напряжения в этом узле становятся постоянными: $\sigma_{xx} \approx const$.

Массив грунта образовавшегося оползневого тела уже практически не влияет на напряженное состояние вмещающего его массива грунта борта выемки.

Возвращаясь к зонам «пластичности» (растяжение), можно сказать, что они всегда возникают на некотором расстоянии от горизонтальной поверхности внутри массива грунта борта сразу над зонами «пластичности» (сжатия), когда его напряженное состояние приближается к предельному по устойчивости. В этом месте, на наш взгляд, происходит зарождение горизонтальных (отслаивание), а потом и вертикальных трещин, не выходящих до поры до времени на поверхности борта. Это отмечалось во всех результатах выполненных вариантов расчетов.

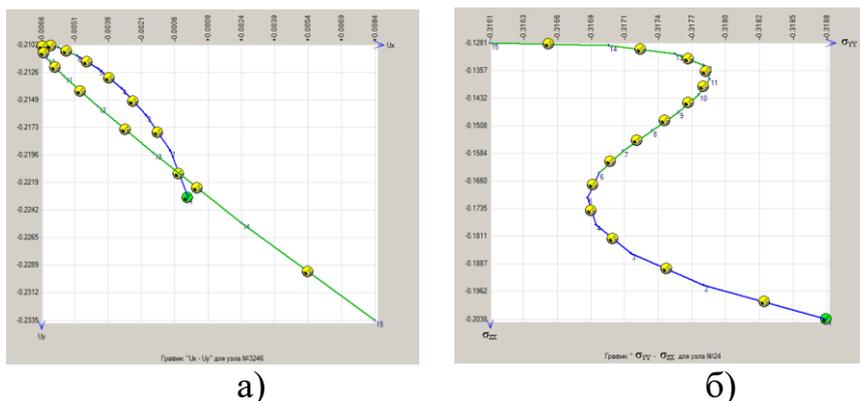


Рисунок 12 – Графики зависимости $u_x - u_y$ (м-м) и $\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$ (МПа-МПа) для узлов: а) – на бровке борта; б) – на левой вертикальной границе в уровне подножия

Возникшие зоны «пластичности» с растяжением являются результатом противоположных движений нижней (нагрузка) и верхней (разгрузка) частей образующегося оползневого тела. На это же указывают и графики зависимости $u_x - u_y$ для узлов и КЭ, расположенных в зоне центров вихрей, где они имеют вид гистерезисных петель, как это изображено на рисунке 13. Расстояние от верха петель до места пересечения линий около 4 мм.

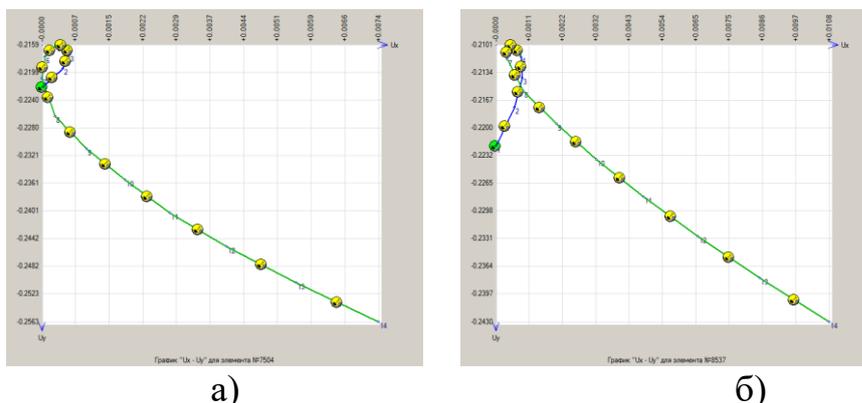


Рисунок 13 – Графики зависимости $u_x - u_y$ (м-м): а) – в зоне центров вихрей для КЭ слева от линии скольжения; б) – то же для КЭ справа от линии скольжения

Во 2-й и 3-й исследовательских задачах используются 2 варианта расчетной схемы системы «выемка – геосреда» с заложением бортов $1:m=1:2$ (задача № 2) и $1:m=1:0,5$ (задача № 3). Значения параметров грунтов в схемах приняты, как и в задаче № 1.

На рисунке 14 показан путь движения слева направо центров вращения в виде флажков в узлах и в виде отметок узлов по координате Y. В сравнении с аналогичными рисунками 8 (1:m=1:1) можно отметить, что, чем выше борты выемки, тем глубже находятся центры вихрей вращения.

В результате последовательных расчетов возникают оползневые тела с вертикальными трещинами глубиной $h_{cr}=2,2$ м, а линии скольжения с $k_{st\ min}$, как и в варианте выемки 1:m=1:1, проходят рядом с границей, разделяющей зоны со значениями $\varepsilon \leq 0$ и $\varepsilon > 0$ (рисунок 15). Предельные глубины экскавации выемок в результате решения этих задач равны: $d_u=44,0$ м и 9,9 м.

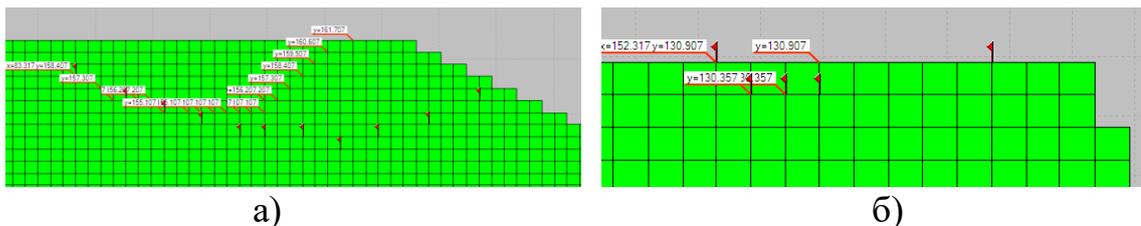


Рисунок 14 – Результаты расчета в виде траекторий движения узлов с центрами вращений вихрей1 (флажки) и вихрей2 (координаты по Y) для выемок с заложением бортов: а) – задача № 2, 1:m=1:2; б) – задача № 3, 1:m=1:0,5

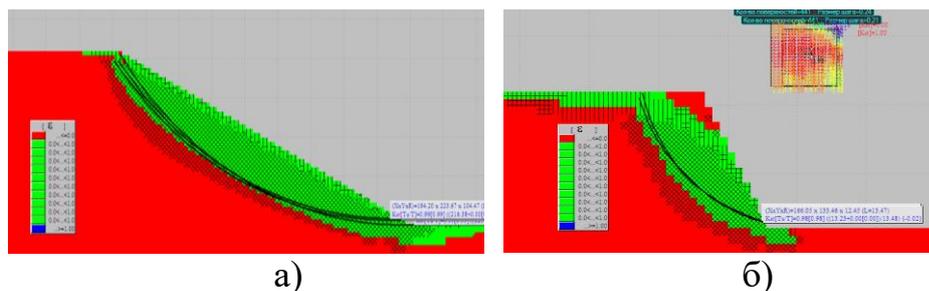


Рисунок 15 – Результаты расчета модели системы «выемка – геосреда» после экскавации – зоны «пластичности» и уровни значений шарового инварианта тензора относительных деформаций ε : $\varepsilon \leq 0$ – красная или более темная окраска; $\varepsilon > 0$ – зеленая или более светлая окраска: а) – с заложением 1:m=1:2; б) – с заложением 1:m=1:0,5

В исследовательской задаче № 4, в первой серии расчетов изменялись значения угла внутреннего трения: $\varphi=12^\circ$, $\varphi=17^\circ$ и 22° ; во второй изменялись значения удельного сцепления c : 0,020, 0,015 и 0,010 МПа.

Здесь же выяснилось, что и изменения в значениях параметров прочности c или φ не влияют на места зарождения вихрей, а пути движения их центров подобны. Для всех вариантов расчетов после последовательного моделирования экскавации грунта из выемки в её бортах формируются оползневые тела, которые, как показано выше, проявляются при выводе уровней значений средних относительных деформаций ε (линия $\varepsilon \approx 0$ близко совпадает с линией скольжения с $k_{st\ min}$).

Пятая глава рассматривает особенности НДС и устойчивости грунтовых массивов при устройстве системы «насыпь – геосреда».

Выбор направлений развития исследования НДС и устойчивости при устройстве систем «насыпь – геосреда» основан на методике, показанной в четвертой главе настоящей диссертации. Также в этой главе рассматривались 4 исследова-

тельских задачи. Расчетные параметры грунтов исследуемых откосов насыпей одинаковы с аналогичными параметрами выемок, рассматриваемых в главе 4.

Численное моделирование устройства систем «насыпь – геосреда» имеет такой вид:

- 1) определение начального НДС природного массива грунтов;
- 2) последовательное послойное моделирование возведения насыпи.

В исследовательских задачах для систем «насыпь – геосреда» выполнялось послойное моделирование возведения насыпи слоями мощностью 1,10 м. Все геометрические размеры этой системы, а также значения физико-механических параметров грунта были одинаковыми с аналогичными данными системы «выемка – геосреда» исследовательских задач, решаемых в главе 4. Граничные условия по вектору смещений (условия закреплений) в процессе решения задачи при $h > d_u$ корректировались. Коррекция выполнялась для условий b/B и $h/H = const$, где b – ширина насыпи поверху, B – ширина её основания, h – высота насыпи, H – высота основания.

При высоте насыпи $h = d_u = 15,40$ м, а это предельная по устойчивости глубина выемки из исследовательской задачи № 1 в главе 4, грунт её откосов также перешел в предельное состояние по устойчивости: $k_{st\ min} = 0,99 < [k_{st}] = 1,00$. В отличие от грунта выемки, в процессе моделирования возведения насыпи в её массиве и основании не было глубинных вихрей, а видны были только их нижние части вблизи поверхностей откосов и основания. Центры вращения вихрей, очевидно, располагаются на некотором расстоянии от этих поверхностей (рисунок 16). На расчетной схеме также не было зон «пластичности» (растяжение). В то же время при выводе уровней значений параметра вида деформированного состояния (Надаи-Лоде) ε_v , в том месте были зоны с его значениями равными: $\varepsilon_v \approx +1,00$ – одноосное растяжение (фиолетовый или темный цвет) (рисунок 17).

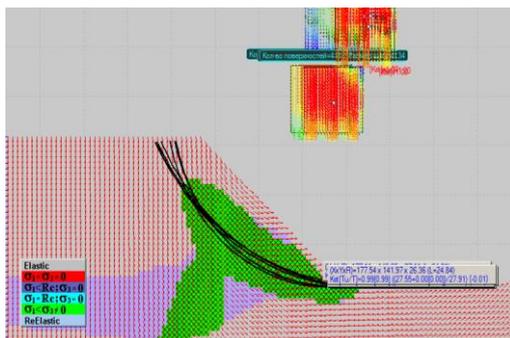


Рисунок 16 – Результаты расчета для системы «насыпь – геосреда» ($h = d_u = 15,40$ м, $1:m=1:1$), поле вектора смещений и зоны «пластичности» (между последними этапами возведения)

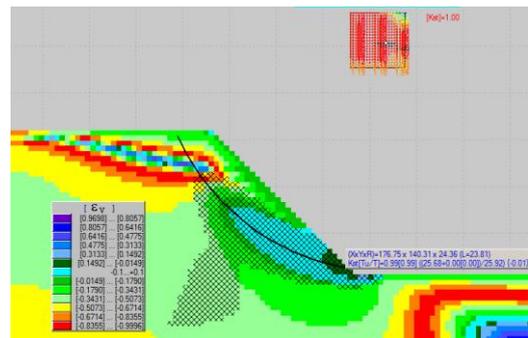


Рисунок 17 – Результаты расчета для системы «насыпь – геосреда» ($h = d_u = 15,40$ м, $1:m=1:1$), зоны «пластичности» и уровни значений параметра вида деформированного состояния (Надаи-Лоде) ε_v

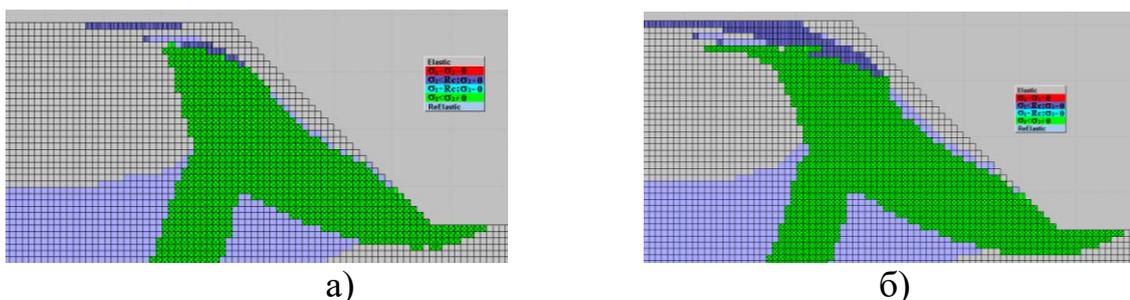


Рисунок 18 – Результаты расчета (насыпь – геосреда, 1:m=1:1) – зоны «пластичности»: а) – появление зон «пластичности» (растяжение) на 16-м этапе; б) – выход трещин на 17-м этапе на поверхность за бровкой откоса насыпи

При сравнении рисунков 18 и 9 можно заметить подобие в условиях образования и развития зон «пластичности» как «сдвига-сжатия», так и «растяжения». В процессе моделирования выемки и насыпи наблюдались и отличия в образовании зон «пластичности» растяжения. В верхней части откосов насыпи и бортов выемки, над зонами «пластичности» (сжатие: $\sigma_1 < \sigma_3 \neq 0$), образуются зоны «пластичности» растяжения с соотношениями главных напряжений: $\sigma_1 < R_c$; $\sigma_3 = 0$. В то же время в зонах «пластичности» насыпи нет мест с условиями растяжения по двум осям: $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$, что наблюдается в бортах выемки (см. рисунок 18 и 9).

Вообще, предельные глубины выемок и высот насыпей определяются несколько позже достижения условия по оценке устойчивости: $k_{st \min} \approx 1,00 \pm 0,02 \approx [k_{st}] = 1,00$. Предельное состояние соответствующих массивов грунтов по устойчивости определяется после образования и выхода на их поверхности вертикальных трещин (см. рисунок 9, г и рисунок 18, б).

Призма оползания и вертикальные трещины в откосах насыпи, как в бортах выемки, хорошо выделяются при выводе на экран уровней значений шарового инварианта тензора относительных деформаций ϵ (рисунок 19).

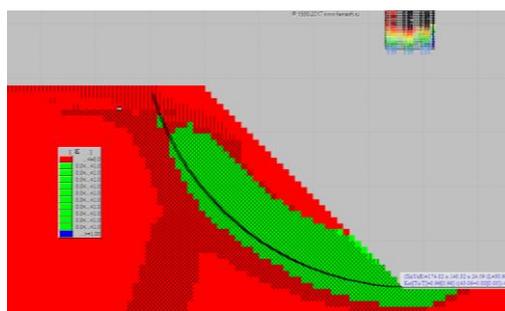


Рисунок 19 – Результаты моделирования, зоны «пластичности» и уровни значений шарового инварианта тензора относительных деформаций ϵ (1:m=1:1, $h_u=18,7$ м, $k_{st \min}=0,97$)

Графики траекторий нагружения в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ϵ_{ij} для КЭ (рисунок 20), расположенных на линии скольжения с $k_{st \min}$, имеют другой вид, чем аналогичные графики, изображенные на рисунке 12 для систем «выемка – геосреда». В пространстве величин $\sigma_i - \sigma$ это траектории «раздавливания». До поверхности текучести линии траекторий имеют один наклон, вблизи и вдоль неё – другой. Здесь в итерацион-

ном процессе конкретный КЭ входит в зону предельного состояния или «пластичности» и наклон траекторий меняется.

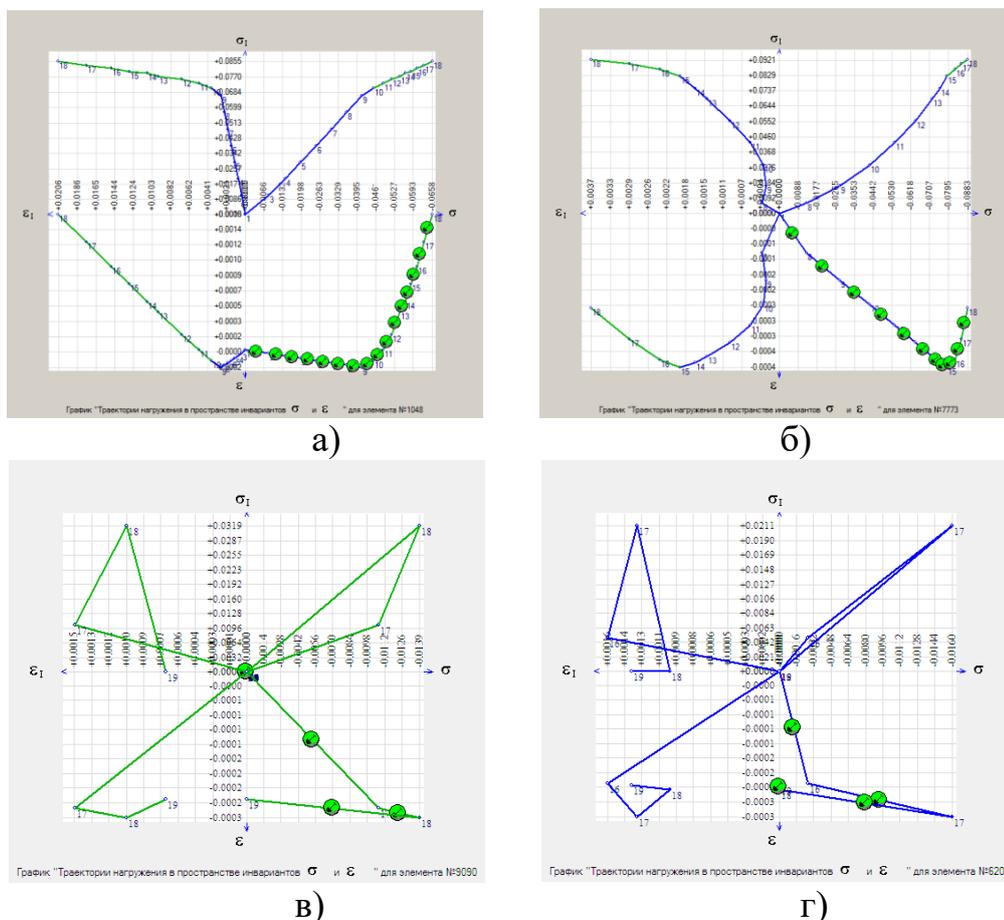


Рисунок 20 – Результаты расчета (насыпь – геосреда, $1:m=1:1$), графики траекторий нагружения: а) – для КЭ в подножии борта; б) – для КЭ, расположенных на линии скольжения в нижней части зон «пластичности»; в) – для КЭ в вершине трещины; г) – для КЭ вблизи поверхности насыпи (в начале линии скольжения)

В пределах длины линии скольжения с $k_{st\ min}$ для систем «насыпь – геосреда» существуют два варианта графиков траекторий нагружения: первые – для зон «пластичности» сжатия (рисунок 20, а и б), вторые – для зон «пластичности» растяжения (рисунок 20, в и г). Последние 2 графика, несмотря на малое количество узлов на линиях (этапов возведения), являются сложными, что можно объяснить образованием зон растяжения на последних этапах моделирования возведения насыпи. Как показано выше, в главе 4, для систем «выемка – геосреда» существуют три варианта графика траектории нагружения (см. рисунок 11). Для систем «насыпь – геосреда» отсутствуют графики с язычковыми изгибами, отражающие движение вихрей1 и вихрей2, которых нет в этих системах.

В остальных трех исследовательских задачах № 2–4 выполнены аналогичные расчеты и анализ НДС. Все параметры расчетов грунтов насыпей приняты такими же, как в задачах № 2–4 в главе 4. Контуры оползней и траектории нагружения в пространстве σ_{ij} и ϵ_{ij} , полученные после расчетов моделирования, близки к задачам № 1 в этой главе.

По всем результатам расчетов выемок и насыпей при заданных параметрах расчета всегда $h_u \geq d_u$, однако, отмечается также, что при одинаковых значениях s и маленьких значениях φ , критическая высота и глубина откоса относительно близки или даже одинаковы. Кроме того, наибольшая разница между h_u и d_u возникает на пологих склонах с $1:m=1:2$.

На рисунке 21 показаны поля вектора главных напряжений в виде двух его компонент σ_1 и σ_3 в массивах выемки и насыпи ($1:m=1:1$). Вывод рисунков для выемки произошел после 12-го этапа экскавации при выходе зон «растяжения» на поверхность её борта, для откоса насыпи это произошло после 16-го этапа возведения также при выходе зон «растяжения» на его поверхность.

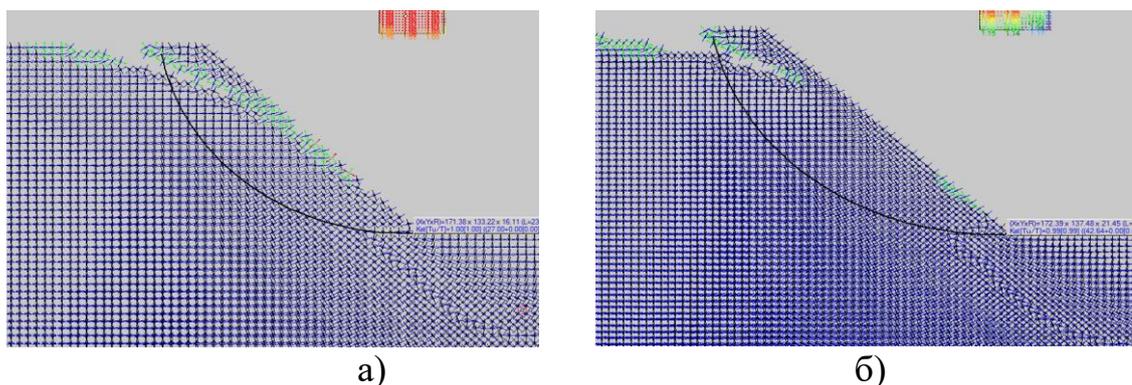


Рисунок 21 – Результаты расчетов – поле вектора главных напряжений σ_1 и σ_3 в выемке – а) и насыпи – б)

Показанные на рисунках темным синим цветом вектора главных напряжений являются сжимающими напряжениями в узлах сетки разбивки. Другие цвета векторов, более светлые, красный и зеленый, указывают на действие в узлах растягивающих напряжений. Отсутствие в узлах верхних частей этих грунтовых сооружений векторов σ_1 и σ_3 , указывает на то, что их значения в этом месте равны нулю. В реальной геологической среде в таких местах образуются вертикальные трещины, одна или несколько (см. рисунок 9, д и е).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения диссертационной работы были сделаны следующие выводы:

1. На основании выполненного анализа и исследования НДС и устойчивости систем «грунтовые сооружения – геосреда» установлено, что для их количественной оценки можно использовать графические зависимости, по которым определяются конкретные траектории нагружения.

2. Выполненный сравнительный анализ НДС систем «грунтовое сооружение – геосреда» и устойчивости при действии разных факторов – технологии устройства, геометрических размеров и форм, механических свойств грунтов – показал, что для КЭ, расположенных на выходе линии скольжения с $k_{st\ min}$, из грунтового массива – подножие, что существует большая разница в траекториях НДС при

устройстве выемок и насыпей. В процессе возведения насыпи грунт всегда нагружается по траектории «раздавливания», а в процессе устройства выемки грунт испытывает более сложные траектории как «раздавливания» так и «удлинения»: расчет значений критических геометрических величин d_u (глубина выемки) и h_u (высота насыпи), полученных при условии $k_{st\ min} \approx 1,00 \pm 0,02$, показывает, что всегда выполняется условие: $h_u \geq d_u$.

3. В результате изучения образования оползневых тел показано, что отличие НДС системы «выемки – геосреда» и «траншея – геосреда» заключается в появлении и развитии мест разрушения. Трещины в выемке образуются за бровкой борта выемки, а в траншее зоны «пластичности» образуются в нижней ее части, там, где происходит вывал грунта, это низ траншеи. Призма оползания и вертикальные трещины в грунтовых массивах для выемок и насыпей хорошо выделяются при выводе на экран уровней значений шарового инварианта тензора относительных деформаций ε . Оползневые тела образуются в зонах «пластичности», сначала это зоны «сдвига с сжатием» или наоборот, затем над этими зонами появляются зоны «растяжения», которые выходят на горизонтальную поверхность массива за её бровкой и завершают образование призмы оползания, снизу она ограничивается линией, на которой и вблизи которой $\varepsilon \approx 0$.

4. Выполненные работы по исследованию образования трещин показывают, что по штриховке и значениям главных напряжений $\sigma_1 \geq 0$ и $\sigma_3 \geq 0$ можно определить местоположение основной вертикальной трещины, реально возникающей за бровками бортов выемок и откосов насыпей.

5. Выполненные исследования подтвердили наличие явления «круга вращений» или «вихря смещения» в грунтовых массивах при моделировании выемок и выяснили места зарождения вихрей смещения и траектории их движения. В массиве насыпи характерно отсутствие этого явления. Выход «круга вращений» на поверхность моделируемого откоса (борта) означает, что он переходит в предельное состояние.

Дальнейшее направление по рассматриваемым исследованиям – более глубокое изучение особенностей НДС неоднородных грунтовых откосов и малоизученных явлений.

Публикации по теме диссертации.

Публикации в изданиях по списку ВАК.

Особенности напряженно-деформированного состояния систем «выемка – геосреда» и «насыпь – геосреда» в процессе моделирования их возведения (часть I) / Н. И. Горшков, М. А. Краснов, Ц. Юань, С. М. Жданова // Транспортные сооружения. – 2020. – № 2. – С. 1–13.

Особенности напряженно-деформированного состояния систем «выемка – геосреда» и «насыпь – геосреда» в процессе моделирования их возведения (часть II) / Н. И. Горшков, М. А. Краснов, Ц. Юань, С. М. Жданова // Транспортные сооружения. – 2020. – № 2. – С. 1–12.

Публикации в остальных изданиях.

Юань Цзинвэнь. Проблемы оценки устойчивости грунтовых сооружений с учетом образования трещин / **Юань Цзинвэнь** // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения : Международный сборник научных трудов. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. – № 16. – С. 106–112.

Юань Цзинвэнь. Проектирование систем «траншея – основание» / Н. И. Горшков, М. А. Краснов, **Юань Цзинвэнь** // Строительная механика и расчет сооружений. – 2017. – № 6. – С. 64–68.

Юань Цзинвэнь. Напряженно-деформированное состояние и устойчивость систем «траншея – геосреда» – влияние некоторых факторов / **Юань Цзинвэнь**, Н. И. Горшков // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения: международный сборник научных трудов. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2017. – № 17. – С. 67–72.

Юань Цзинвэнь. Оценка устойчивости грунтовых склонов (откосов) методом изменения прочностных характеристик (МИПХ) в программе GenIDE32 / Н. И. Горшков, **Юань Цзинвэнь** // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения : Международный сборник научных трудов. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. – № 18. – С. 48–53.

Czinven, Y. Criterion assessment of soil transport structure stability / Gorshkov N, Zhdanova S, Krasnov M, **Czinven, Y** // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2019, 265: 04008.

Юань Цзинвэнь. Представления оползневых тел в расчетах НДС и устойчивости грунтовых сооружений / Н. И. Горшков, **Юань Цзинвэнь** // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения : Международный сборник научных трудов. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2019 – № 19. – С. 60–70.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

ЮАНЬ ЦЗИНВЭНЬ

**ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ В ВЫЕМКАХ И НАСЫПЯХ
ПРИ УСТРОЙСТВЕ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

2.1.8 Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов,
мостов и транспортных тоннелей

Подписано в печать 10.06.2024. Формат 60x84¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ.

Издательство Тихоокеанского государственного университета.
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Издательско-копировальный отдел Тихоокеанского государственного университета.
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.