

На правах рукописи



Соколов Михаил Валерьевич

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
УКРЕПЛЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВЫХ ГРУНТОВЫХ
ОСНОВАНИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ
ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Специальность: 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово 2018

Работа выполнена на кафедре теоретической и геотехнической механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева».

Научный руководитель	Простов Сергей Михайлович доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и геотехнической механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева», профессор
Официальные оппоненты	Лобанова Татьяна Валентиновна доктор технических наук, научный руководитель НИП «Геомеханика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» Патутин Андрей Владимирович кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических методов воздействия на массив горных пород Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Института горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук»
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится 01.11.18 в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 212.102.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, факс (3842) 5833-80, e-mail: rector@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» и на сайте организации по адресу: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2018/sok/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Иванов В. В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Одной из основных проблем горнодобывающих предприятий является обеспечение устойчивости сооружений поверхностных комплексов. При строительстве, а также на различных стадиях эксплуатации копров, воздухоподающих каналов, опор галерей различного назначения, комплексов наклонной сепарации и обогащения, трансформаторных подстанций, водоотливных установок, примыкающих зданий были зафиксированы визуальные признаки осадок фундаментов. Причиной подобных проявлений являются естественные и техногенные факторы, влияющие на прочностные и деформационные свойства грунтов, действие которых в условиях горнодобывающих предприятий усиливается сейсмическим воздействием взрывных работ, подработкой, резкими изменениями гидрогеологического режима грунтов (влагонасыщение, в т. ч. агрессивными к железобетону растворами), частым применением при устройстве оснований вскрышных пород. Кроме того, работа технологических механизмов (подъемных, вентиляционных установок, конвейеров и др.) приводит к асимметрии и неравномерности нагрузок на фундамент. По данным ООО «НООЦЕНТР», специализирующегося на проведении аварийно-восстановительных работ на сооружениях горного и строительного профиля, за последние 10 лет на сооружениях шахт и разрезов Кузбасса зафиксировано 36 аварийных ситуаций, вызванных развитием деформаций грунтов оснований.

Уплотнение грунтов с целью повышения их прочностных и деформационных характеристик все активнее применяется при строительстве и реконструкции зданий и сооружений как горнодобывающей, так и строительной отраслей промышленности. Для грунтовых оснований, сложенных гравелистыми и песчаными грунтами, наибольшее применение нашли методы инъекции цементных растворов, в песчано-глинистых грунтах используют химические растворы, а в обводненных глинах, илах весьма перспективен метод электрохимического закрепления. Указанные технологии находятся на разных стадиях практического применения, вместе с тем недостаточно изученным является геомеханический аспект проблемы управления механическими свойствами грунтов. Аналитические расчетные методы, основанные на применении классических законов механики, развивающиеся длительное время, дают приемлемую точность результатов только при решении весьма узкого круга задач. Интенсивное развитие получили методы компьютерного моделирования, использующие численное решение задач геомеханики. Созданы мощные вычислительные комплексы, обеспечивающие максимальное приближение к реальной среде при постановке широкого круга задач.

До настоящего времени не изучены следующие аспекты данной проблемы: не обоснованы рациональные параметры геомеханических моделей укрепляемых грунтовых оснований горнотехнических зданий и сооружений, методики и количественные критерии для обработки и анализа баз данных; не установлены закономерности изменения геомеханического состояния при укреплении грунтовых оснований неоднородного строения при асимметричной и неравномерной нагрузке; не разработа-

ны практические рекомендации по геомеханическому обоснованию параметров укрепления оснований эксплуатируемых горнотехнических зданий и сооружений с учетом влияния горных работ.

Работа выполнена в соответствии с планами НИР КузГТУ по хоздоговору с ООО «НООСТРОЙ» № 102–2017, при поддержке гранта АО «СУЭК–Кузбасс» на проведение научных исследований по приоритетным направлениям науки в области рационального природопользования.

Цель работы: разработка методики геомеханического обоснования параметров укрепляемых неустойчивых грунтовых оснований эксплуатируемых горнотехнических зданий и сооружений, обеспечивающей повышение безопасности горных работ, снижение материальных и трудовых затрат на строительно-восстановительные работы.

Объект исследований: грунтовые массивы в основаниях наземных горнотехнических зданий и сооружений, подлежащие укреплению инъекционными методами.

Предмет исследования: геомеханическое состояние укрепляемых грунтовых оснований в различных геологических и горнотехнических условиях.

Идея работы состоит в использовании базовых и локальных геомеханических моделей грунтовых оснований, учитывающих неоднородность свойств грунтов, неравномерность и асимметрию нагрузки, для установления закономерностей формирования их геомеханического состояния и корректирования параметров технологии напорного инъекционного укрепления, определенных методом геотехногенных блоков по осредненным параметрам.

Задачи исследования:

- разработка алгоритмов и критериев анализа результатов компьютерного моделирования геомеханического состояния укрепляемых грунтовых оснований горнотехнических зданий и сооружений с учетом влияния горных работ;
- установление закономерностей изменения геомеханического состояния при укреплении оснований горнотехнических зданий и сооружений в условиях неоднородности свойств грунтов, асимметрии и неравномерности нагрузки;
- разработка и практическое применение рекомендаций по укреплению оснований горнотехнических зданий и сооружений на основе базовых и локальных геомеханических моделей.

Методы исследований.

В работе использован комплекс методов, включающий:

- анализ научно-технической информации по проблеме управления свойствами неустойчивых грунтовых массивов горнотехнических сооружений;
- компьютерное моделирование геомеханических процессов в естественных и искусственных грунтовых основаниях зданий и сооружений методом конечных элементов;
- анализ баз данных напряженно-деформированного состояния (НДС) с использованием локальных и интегральных геомеханических критериев;
- методы разработки циклических алгоритмов и компьютерных программ для обработки баз данных;

– анализ результатов инженерно-геологических изысканий и маркшейдерско-геодезических измерений.

Научные положения, защищаемые в диссертации:

– повышение объективности и точности анализа баз данных геомеханического состояния грунтовых оснований на участках подработки, подтопления, использования вскрышных пород обеспечивается построением зон предельного состояния и интегральных показателей, учитывающих распределение локальных значений напряжений и деформаций по интервалам и площадям, определенных с помощью циклических алгоритмов путем разбиения полей изолиний на элементы;

– при закреплении однородного обводненного естественного или насыпного грунтового основания величина оседаний грунтов нелинейно уменьшается до 25 % с увеличением размеров и площади зон закрепления, на 10–20 % с увеличением расстояния между ними и их относительной жесткости; в двухслойном насыпном основании с углом наклона до 18° снижение концентрации напряжений в слабом слое более чем в 3 раза обеспечивается расположением зоны закрепления в нижнем, более жестком слое;

– дополнительная горизонтальная нагрузка, возникающая при работе горношахтных механизмов, увеличивает концентрацию напряжений в опорной части основания в 2–3 раза, при этом зоны упрочнения с продольной площадью 1,8–3,6 м² снижают величину интегрального показателя горизонтальных деформаций на 60–70 %, что уменьшает риск снижения устойчивости фундамента;

– интеграция геомеханического прогноза в существующий метод геотехногенных блоков обеспечивается определением образованных влиянием горных работ потенциально аварийных участков по превышениям предельных нормативных оседаний с помощью базовой геомеханической модели и корректированием базовых параметров по экстремальным и интегральным значениям составляющих НДС на локальных моделях этих участков.

Научная новизна работы заключается:

– в обосновании интегральных критериев анализа геомеханического состояния укрепляемых грунтовых неоднородных оснований сооружений и разработке алгоритмов для их определения;

– в установлении закономерностей формирования геомеханического состояния грунтовых оснований однородного и слоистого строения при равномерном, неравномерном и асимметричном нагружении оснований сооружений;

– в разработке двухэтапной методики геомеханического обоснования параметров укрепления неустойчивых грунтовых оснований, интегрированной в метод геотехногенных блоков, учитывающей дополнительное влияние горнотехнических процессов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

– использованием в компьютерных расчетах апробированного метода конечных элементов и лицензионного программного комплекса Alterra, предоставленного в некоммерческое пользование ООО «ИнжПроектСтрой»;

- сходимостью результатов сопоставления расчетных и экспериментальных значений оседаний оснований по двум объектам (расхождение не более 17 %);
- использованием при геомеханических расчетах данных инженерно-геологических изысканий и маркшейдерско-геодезических измерений, полученных стандартными методами.

Личный вклад автора заключается:

- в разработке методики выбора рациональных параметров компьютерной модели, алгоритмов расчета интегральных параметров и геомеханических зон;
- в создании компьютерных моделей естественных и искусственных грунтовых оснований различного строения при различных схемах нагрузки на фундаменты сооружений, проведении компьютерных расчетов, их обработке и анализе;
- в разработке методики геомеханического обоснования параметров укрепления грунтовых оснований, развивающей метод геотехногенных блоков для условий неоднородных массивов;
- в геомеханическом прогнозе состояния укрепляемых грунтовых оснований четырех горно-строительных объектов и разработке рекомендаций по повышению их устойчивости.

Научное значение работы состоит:

- в развитии методического обеспечения компьютерного моделирования геомеханического состояния укрепляемых грунтовых оснований сооружений в условиях интенсивного влияния горных работ;
- в расширении знаний о закономерностях формирования аномальных геомеханических зон грунтовых оснований сложного строения при асимметричных и неравномерных нагрузках;
- в обосновании двухэтапной методики корректирования параметров укрепления грунтов, полученных методом геотехногенных блоков, на основе базовой и локальной геомеханических моделей.

Отличие от ранее выполненных работ состоит в следующем:

- при обработке результатов компьютерного моделирования геомеханического состояния укрепляемых грунтовых оснований использовались интегральные критерии, расширяющие возможность обобщения исследуемых закономерностей;
- впервые исследованы основные факторы, влияющие на формирование аномальных геомеханических зон (слоистость, асимметрия и неравномерность нагрузки), причем при анализе рассматривались все компоненты напряжений и деформаций массива;
- реализована идея учета при обосновании параметров укрепления реальной неоднородности свойств грунтов на основе локальных геомеханических моделей.

Практическая ценность работы заключается:

- в разработке программ для ЭВМ «Программа для построения зон напряженно-деформированного состояния укрепляемых грунтовых оснований» и «Программа для определения интегрального показателя напряженно-деформированного состояния укрепляемых грунтовых оснований», прошедших государственную регистрацию (свидетельства № 2015611668 и № 2015611451);

– в разработке методических рекомендаций по корректировке параметров укрепления грунтовых оснований на проектируемых, строящихся и эксплуатируемых горнотехнических зданиях и сооружениях, пришедших в аварийное состояние в результате технологических ошибок или техногенного воздействия, реализованных на четырех объектах горно-строительного профиля в Кузбассе.

Реализация работы

Основные научно-практические положения диссертации изложены в методическом документе «Методические указания по определению параметров укрепления неустойчивых грунтовых оснований строящихся и эксплуатируемых горнотехнических сооружений / КузГТУ, ООО «НООЦЕНТР». – Кемерово, 2017. – 43 с.», разработанном совместно КузГТУ и ООО «НООЦЕНТР», согласованном с НИИОСП им. Н. М. Герсевича и принятом к использованию ОАО «Кузбассгипрошахт» при проектировании шахт и разрезов.

Полученные теоретические и методические результаты используются в учебном процессе КузГТУ.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы рассматривались на следующих конференциях, симпозиумах: на китайско-российском симпозиуме «Уголь. 21 век» (Китай, Россия, 2014, 2016); на международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах» (Кемерово, 2013); на научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая» (Кемерово, 2014, 2015, 2016); на международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СибРесурс2014» (Кемерово, 2014, 2016); на всероссийской научно-практической школе «Роль молодых ученых в инновационном развитии регионов» (Кемерово, 2014); на международной научно-практической конференции «Проблемы строительного производства и управления недвижимостью» (Кемерово, 2014, 2016); на всероссийской научной конференции «Горняцкая смена 2015» (Новосибирск, 2015); на международной научно-практической конференции «Современная наука: проблемы и пути их решения» (Кемерово, 2015); на международной научно-практической конференции «Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (Новокузнецк, 2016).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК, в том числе получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 5 приложений, изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 90 рисунков, 13 таблиц, список литературных источников из 143 наименований.

Автор диссертации и научный руководитель выражают признательность генеральному директору ООО «НООЦЕНТР» к.т.н., О. В. Герасимову за предоставленную техническую документацию и результаты инженерно-геологических изысканий на производственных объектах.

Основное содержание работы

В первой главе приведен анализ состояния проблемы управления свойствами неустойчивых грунтовых оснований горнотехнических сооружений.

Основные причины образования и развития опасных деформаций грунтовых оснований объектов строительной геотехнологии заключаются в следующем: ошибки при инженерных изысканиях и проектировании; нарушение технологии строительства; технологические аварии; сейсмическое воздействие. В угледобывающей промышленности такими объектами являются горнотехнические здания производственного, энергетического и административного назначения и горнотехнические сооружения. Деформации конструкций проявляются в виде явных признаков (обрушение, крены, изломы элементов и др.) и неявных, выявляемых только инструментальными методами. Деформационные явления имеют место при строительстве на естественных основаниях и в значительно большей степени – на насыпных вскрышных породах. Зафиксирован ряд аварийных ситуаций на горнотехнических сооружениях угольных разрезов и шахт Кузбасса.

Для управления свойствами ослабленных и разуплотненных грунтов применяют комплекс физических и физико-химических методов, рациональная область применения которых в значительной мере зависит от типа грунтов, слагающих основание. Наибольшее распространение в России получили методы закрепления грунтов цементацией (струйная технология, напорная инъекция, буросмешивание). Весьма перспективна технология электрохимического закрепления, основания на электрообработке массива постоянным током в комбинации с вяжущими химическими составами, которая практически не имеет конкуренции для малопроницаемых грунтов с коэффициентом фильтрации менее 10^{-6} м/с.

Значительный вклад в развитие методов укрепления грунтов внесли Абелев М. Ю., Алексеев С. И., Берлинер В. И., Богомоллов В. А., Бройд И. И., Должиков П. Н., Ибрагимов М. Н., Коробова О. П., Лушников В. В., Малинин А. Г., Мангушев Р. А., Ржаницын Б. А., Семкин В. В., Соколов В. Е., Страданченко С. Г., Юрданов А. П. и др.

Для эффективного применения методов управления состоянием и свойствами неустойчивых грунтовых массивов необходимы методы геоконтроля, предназначенные для диагностирования зон с низкими строительными свойствами и мониторинга изменений этих свойств в процессе обработки и после ее завершения. Эти методы разделяют на визуальные и инструментальные, включающие комплексы механических, гидро-, газодинамических и геофизических методов. Прогнозирование устойчивого состояния объектов производят по результатам геоконтроля с использованием эмпирических, аналитических и численных методов обработки, включающих специализированные номограммы, алгоритмы и компьютерные программы. Теория, методика и практика решения геомеханических задач на основе данных инструментальных измерений рассмотрена в работах Вейскарами М., Магдыча В. И., Мирмаянпова И. Т., Петровича Б., Пушилина А. И., Пшеничкиной В. А., Стромовой Л. А., Тырымова А. А., Усанова С. В. и др.

В настоящее время весьма интенсивно развиваются методы геомеханического моделирования, основным достоинством которых является возможность установления фундаментальных закономерностей изменения НДС грунтовых оснований в широком диапазоне геологических и горнотехнических условий. Аналитические расчетные методы основаны на классических законах геомеханики, изложенных в фундаментальных монографиях Баклашова И. В., Бартоломея Л. А., Булычева Н. С., Гольдштейна М. Н., Горбунова-Посадова М. И., Ерофеева Л. М., Картозии Б. А., Карташова Ю. М., Курлени М. В., Либермана Ю. П., Протосени А. Г., Соболевского Ю. А., Трупака Н. Г., Тер-Мартirosяна З. Г., Фотиевой Н. Н. и др. дают приемлемую точность решения только для однородных массивов и простых расчетных схем.

Методы численного компьютерного моделирования все активней применяются для решения геомеханических задач. Наибольшее распространение получил метод конечных элементов, основные теоретические и методические положения которого развиты в работах Зинкевича О., Моргана К., Тейлора Р., Фадеева А. Б. и др.

Решение целого ряда разнообразных научно-практических геомеханических задач подземной, открытой и строительной геотехнологий рассмотрены в публикациях Баряха А. А., Бахасовой С. П., Безволева С. Г., Богомолова А. Н., Богомолова В. А., Глазкова Ю. Ф., Гоголина В. А., Гурьева Д. В., Еременко А. А., Ермаковой И. А., Зерцелова М. Г., Златицкой Ю. А., Кантера С. Л., Корнеевой Е. С., Курлени М. В., Лобановой Т. В., Мельникова Б. И., Миренкова В. Е., Мозгачевой О. А., Мюджа Д., Опарина В. Н., Павлова В. А., Павлова С. В., Павловой Л. Д., Патутина А. В., Петрухина В. П., Пириевой Н. Н., Преслера В. Т., Разумовой Л. В., Сердюкова С. В., Серякова В. М., Стромовой Л. Д., Татариновой Л. Л., Тер-Мартirosяна А. З., Тер-Мартirosяна З. Г., Фрянова В. Н., Черданцева Н. В., Черданцева С. В., Шапиро Д. М., Шулятьева О. А. и др.

В результате анализа методов решения рассматриваемой проблемы сформулированы цель и задачи исследований, приведенные в общей характеристике работы.

Вторая глава посвящена разработке методического обеспечения компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния укрепляемых грунтовых оснований горнотехнических сооружений с учетом влияния горных работ.

В соответствии с классическими положениями метода конечных элементов в плоской модели функция смещения f точки с координатами x, y содержит горизонтальную u и вертикальную v компоненты, задается вектор-столбцом (Зинкевич О. С., К. Морган, R. L. Taylor):

$$\{f(x, y)\} = [N]\{\delta\} = [N_i, N_j, N_m, \dots] \begin{Bmatrix} \Delta_i \\ \Delta_j \\ \Delta_m \\ \dots \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где $[N]$ – специальные функции; $[\Delta]$ – узловые смещения.

При этом напряженно-деформированное состояние (НДС) точки описывается вектор-столбцами деформаций и напряжений

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (2) \quad \{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [D]\{\varepsilon\}, \quad (3)$$

где $[D]$ – матрица деформационных свойств среды

$$[D] = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$[E]$ – модуль деформации; μ – коэффициент поперечных деформаций.

Разработан общий алгоритм моделирования НДС грунтового основания, включающий назначение основных физических и геометрических параметров, размеров модели, типа и количества конечных элементов, формирование областей элементов, граничных условий и расчетных матриц, выполнение вычислений с матрицами, проверку и корректировку параметров расчета, вывод результатов расчета. В результате сопоставления функциональных возможностей четырех программных комплексов установлено, что предоставленный ООО «ИнжПроектСтрой» в некоммерческое пользование продукт «Alterra» обеспечивает возможность решения поставленных задач при погрешности расчетов менее 6 %.

Алгоритм программы включает корректирование матриц НДС путем циклической проверки по критериям прочности, неизменчивости модели и наличии неустановившихся деформаций, что дает возможность рассчитывать отдельно полные, упругие и пластические деформации.

Для базовой модели геомеханического моделирования естественного грунтового основания в заданном диапазоне физико-механических свойств установлено, что зависимость погрешности расчета δ от высоты модели H_m имеет область экстремума, а от ширины модели B_m и числа элементов N – монотонная (рис. 1).

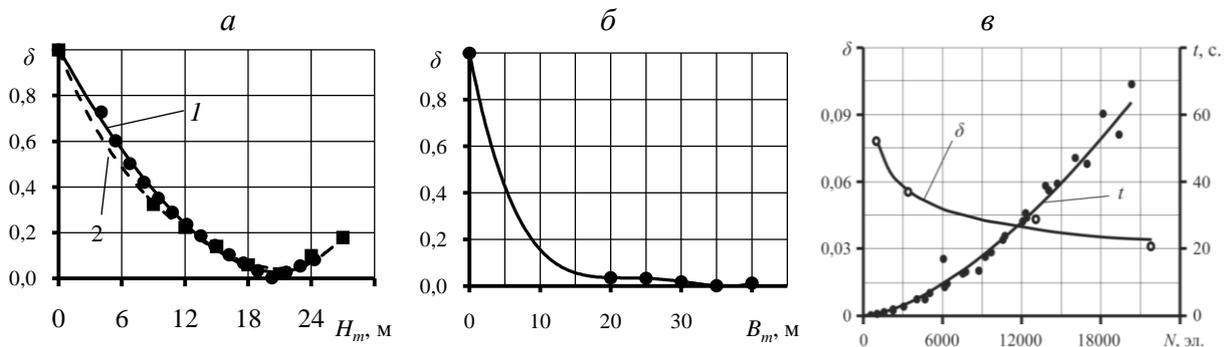


Рис. 1. Зависимости погрешности δ от H_m (а), δ от B_m (б), δ и времени t счета от N (в):
1 – при отношении $H_m/B_m = 4:3$; 2 – при постоянной $B_m = 20$ м

По критерию $\delta < 5\%$ установлены рациональные диапазоны данных параметров модели при максимальном времени счета $t < 60$ с:

$$B_m = (11...17)b; \quad B_m = (1,5...2)H_m; \quad (5)$$

где b – ширина подошвы фундамента.

Для базовой модели искусственного грунтового основания разработан алгоритм формирования базы данных для основных типов фундаментов (ленточного и столбчатого) в форме изолиний перемещений, деформаций и напряжений (рис. 2).



Рис. 2. Основной алгоритм формирования исходной базы данных:

E – модуль деформации; ν – коэффициент Пуассона; C – сцепление; φ – угол внутреннего трения; a, b, c, α – параметры модели фундамента; r, H, l – параметры зоны укрепления; $E_y, \nu_y, C_y, \varphi_y$ – параметры укрепленного грунта; ρ, F, W, I_a – параметры материала тела фундамента; P, q – нагрузка на фундамент

Для обработки баз данных НДС грунтовых оснований в качестве количественных параметров целесообразно использовать расстояния до экстремальных значений параметров, коэффициенты концентрации по отношению к их значениям в нетронутом массиве, а также границы зон НДС по классическим критериям устойчивости и интегральные показатели, учитывающие распределение локальных значений параметров по интервалам, площадям и объемам зон НДС:

$$I = \frac{\sum \sigma_i \cdot S_i}{\sum S_i}, \quad G = \frac{\sum \varepsilon_i \cdot S_i}{\sum S_i}, \quad (6)$$

где I, G – интегральные показатели напряжений и деформаций; σ_i, ε_i – локальные значения напряжений и деформаций; S_i – площадь i -го элемента.

Для построения зон НДС и расчета их параметров по базам изолиний разработан циклический алгоритм, включающий определение критических значений параметров по критериям Кулона-Мора, максимальных напряжений и границ сжимаемой толщи. Для автоматизации расчета интегральных численных показателей НДС

разработана циклическая программа, включающая разбиение поля изолиний, формирование матриц локальных значений σ и ε , расчет интегральных показателей I и G в пределах зон НДС. Алгоритмы реализованы в форме компьютерных программ в среде Delphi 7 на языке программирования Object Pascal и защищены свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Полученные результаты позволили сформулировать первое научное положение.

Третья глава посвящена установлению закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния при укреплении оснований горнотехнических сооружений.

При закреплении однородного грунтового основания происходит перераспределение напряжений и деформаций в более глубокие зоны массива. При этом вертикальные смещения фундамента Δ_z монотонно убывают с возрастанием высоты h_z и диаметра d_z зон закрепления, относительного расстояния между этими зонами к ширине фундамента r/b_f и их относительной жесткости E_z/E (рис. 3).

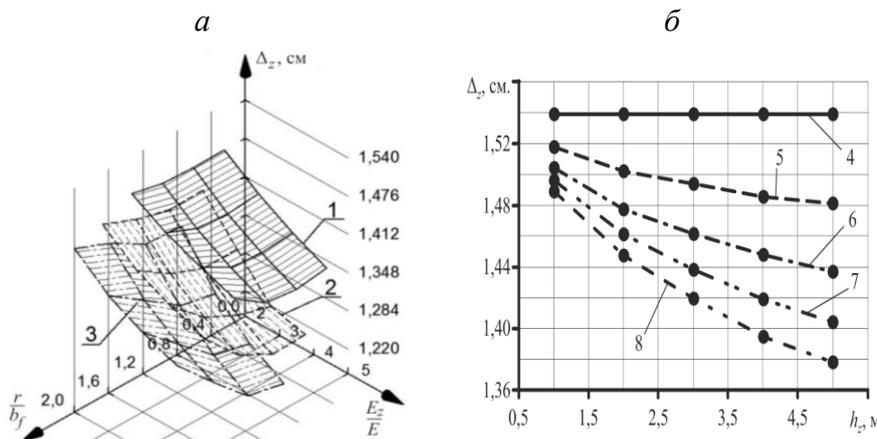


Рис. 3. Зависимости вертикальных смещений Δ_z при высоте $h_z = 5$ м от диаметра d_z , отношений r/b_f и E_z/E (б) и Δ_z от высоты h_z при $d_z = 0,3$ м (а):

1 – $d_z = 0,3$ м; 2 – $d_z = 0,6$ м;
3 – $d_z = 0,9$ м; 4 – $E_z/E = 1$; 5 – $E_z/E = 2$; 6 – $E_z/E = 3$; 7 – $E_z/E = 4$; 8 – $E_z/E = 5$

Величина отрицательного приращения оседаний после закрепления Δ' , характеризующая эффективность укрепления грунтов, нелинейно возрастает с увеличением диаметра d_z , высоты h_z и продольной площади S_z зоны закрепления (рис. 4).

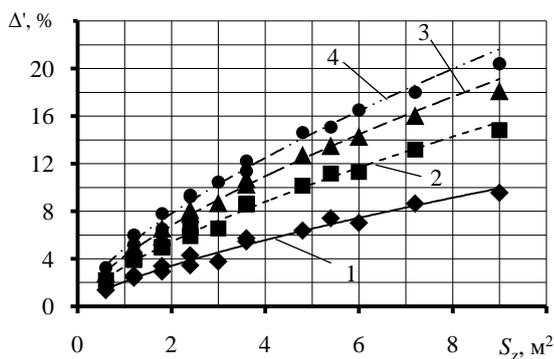


Рис. 4. Зависимости относительных отрицательных приращений смещений Δ' от продольной площади зон закрепления S_z при отношении E_z/E , равном:

1 – $E_z/E = 2$; 2 – $E_z/E = 3$; 3 – $E_z/E = 4$;
4 – $E_z/E = 5$

Распределение по глубине вертикальных напряжений σ_z стабилизируется при $d_z > 6$ м и $h_z > 4$ м. Вертикальные деформации повторяют графики напряжений, а горизонтальные – выравниваются по глубине зоны закрепления. Зона закрепления как элемент строительной конструкции испытывает сложное НДС с концентрацией напряжений и деформаций в верхней и нижней областях, т.е. работает как балка с защемлением в прочном грунтовом слое. При асимметричной нагрузке, включающей

горизонтальную составляющую T , соизмеримую с вертикальной P , возникающую от натяжения канатов копра или ветровой нагрузки, происходит смещение максимальных вертикальных напряжений σ_z в опорную часть массива под фундаментом, при этом асимметрия напряжений увеличивается с ростом отношения T/P , а величины коэффициентов их концентрации k_i линейно зависят от этого отношения и снижаются с увеличением площади зон закрепления S_z (рис. 5):

$$k_i = \frac{\sigma_{\max,i}}{\sigma_{0,i}}, \quad (7)$$

где $\sigma_{\max,i}$ – максимальные значения напряжений вдоль i -ой оси, кПа; $\sigma_{0,i}$ – значения напряжений нетронутой части массива вдоль i -ой оси, кПа.

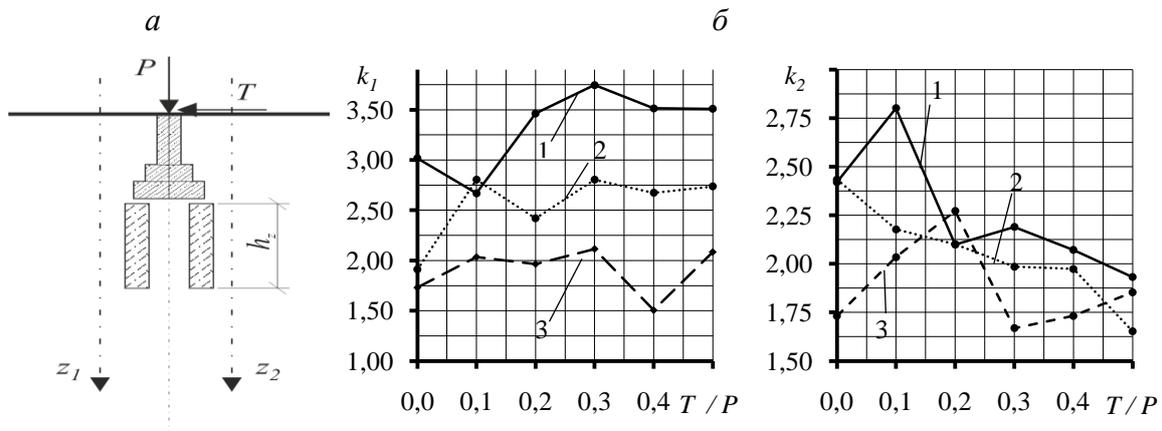


Рис. 5. Схема закрепления (а) и зависимости коэффициентов концентрации в опорной части массива k_1 и со стороны приложения нагрузки k_2 (б) от отношений T/P при продольной площади зон закрепления S_z , равной:
1 – $S_z = 0 \text{ м}^2$; 2 – $S_z = 1,8 \text{ м}^2$; 3 – $S_z = 2,4 \text{ м}^2$

Сжимающие горизонтальные напряжения σ_x увеличиваются с опорной стороны, а со стороны приложения нагрузки T формируются отрицательные напряжения, повышающие вероятность потери устойчивости фундамента. Зона упрочнения не изменяет напряженного состояния выше подошвы фундамента, но снижает их уровень ниже нее. Деформированное состояние при увеличении отношения T/P также изменяется только в верхней части основания. Графики зависимостей интегральных показателей от отношения T/P для всех составляющих напряжений и деформаций показывают, что укрепление в диапазоне продольной площади $S_z = 1,8\text{--}3,6 \text{ м}^2$ снижают величины I_z и G_z на 10–15 %, а G_x – до 60–70 %, снижая риск нарушения устойчивости фундамента (рис. 6).

При моделировании двухслойного основания, закрепляемого по трем схемам, установлено, что при углублении в нижний жесткий слой в нем образуются дополнительные зоны максимальных вертикальных напряжений, уровень которых увеличивается как по оси симметрии, так и по боковой грани зоны упрочнения, при отношении модулей деформации слоев $E_2/E_1 = 5$ соотношение коэффициентов концентрации в слабом и сильном слоях за счет упрочнения уменьшаются более чем в 3 раза (рис. 7, б).

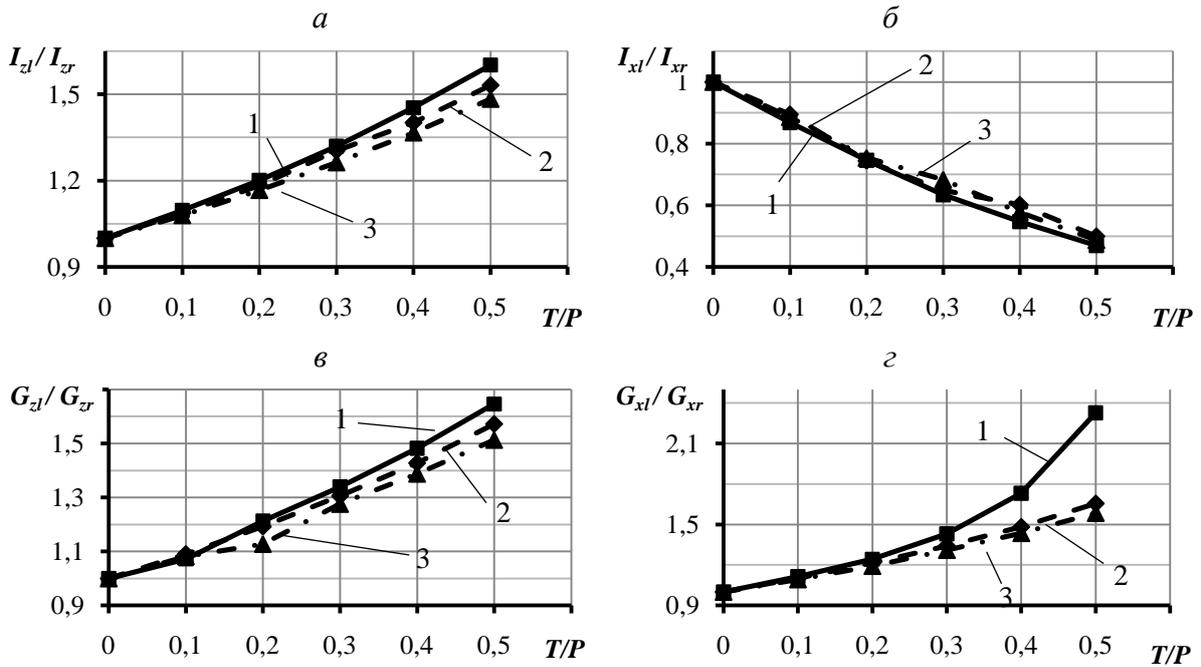


Рис. 6. Зависимости отношения интегральных показателей левой (*l*) и правой (*r*) зоны закрепления вертикального I_{zl}/I_{zr} (*a*), горизонтального I_{xl}/I_{xr} (*б*) напряженного состояния и вертикального G_{zl}/G_{zr} (*в*), горизонтального G_{xl}/G_{xr} (*г*) деформированного состояния зон закрепления от отношения нагрузок T/P при площади зоны закрепления S_r , равной:
 1 – $S_r = 1,8 \text{ м}^2$; 2 – $S_r = 2,4 \text{ м}^2$; 3 – $S_r = 3,6 \text{ м}^2$

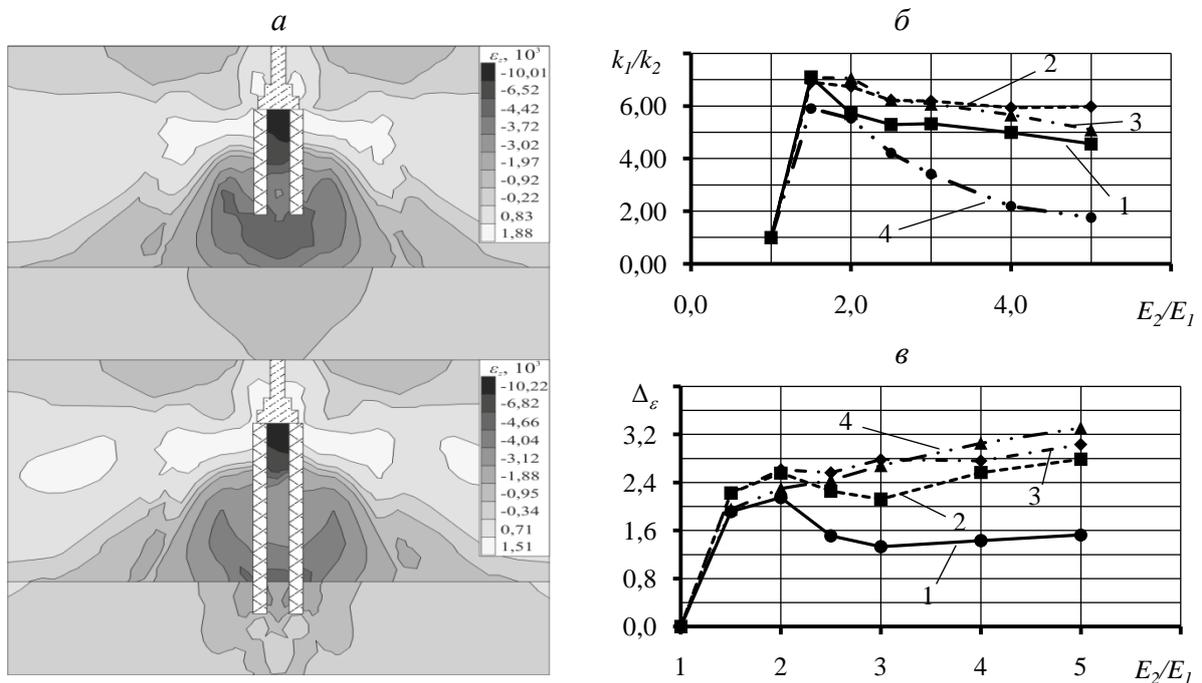


Рис. 7. Результаты расчета вертикальных деформаций ε_z при закреплении по двум схемам (*a*), зависимость отношений коэффициентов концентрации k_1/k_2 (*б*) и изменений $\Delta\varepsilon$ на границе слоев (*в*) от отношения E_2/E_1 :

1 – естественный массив; 2 – при закреплении в слабом слое;
 3 – на границе слоев; 4 – в жестком слое

Вертикальные деформации концентрируются в пределах слабого слоя, на границе слоев зафиксирована разность деформаций Δ_ε , величина которых увеличивается с ростом отношения E_2/E_1 для всех схем закрепления (рис. 7, в).

Исследовано изменение угла наклона границы слоев в диапазоне $\beta = 0-18^\circ$. Графики распределения вертикальных деформаций ε_z и их скачка на границе слоев при всех схемах закрепления в диапазоне $E_1/E_2 = 0,22-1,0$ показывают, что влияние изменения β близко к погрешности расчета (5%) и в геомеханических прогнозах может не учитываться.

При нагружении однородного массива разнонагруженными штампами была установлена близкая к линейной зависимость отношения вертикальных смещений от отношения нагрузок P_2/P_1 (рис. 8).

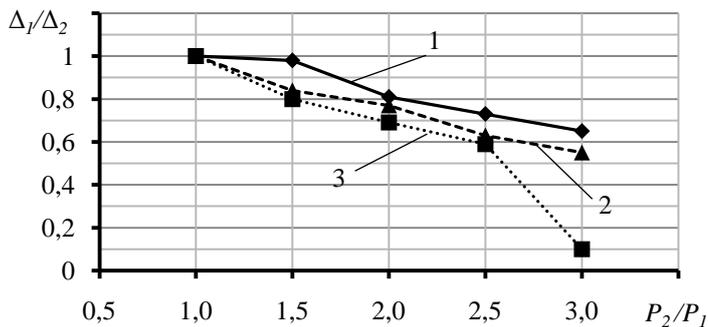


Рис. 8. Зависимости отношения вертикальных смещений (осадок) под штампами Δ_1/Δ_2 от отношения нагрузок на штампы P_2/P_1 при P_1 , равном:

1 — $P_1 = 40$ кН; 2 — $P_1 = 60$ кН;
3 — $P_1 = 80$ кН

Если вертикальные напряжения монотонно убывают с глубиной, то у горизонтальных установлена зона образования отрицательных напряжений, которые распространяются в менее нагруженный массив, а коэффициент их концентрации линейно зависит от соотношения нагрузок P_2/P_1 (рис. 9).

Графики горизонтальных деформаций говорят о том, что происходят поперечные смещения грунта в противоположных направлениях, причем с ростом отношения P_2/P_1 , асимметрия деформаций усиливается.

Основная особенность НДС неравномерно нагруженного слоистого массива состоит в том, что вертикальные деформации сосредоточены в пределах первого слабого слоя, а горизонтальные — локализованы на его границе.

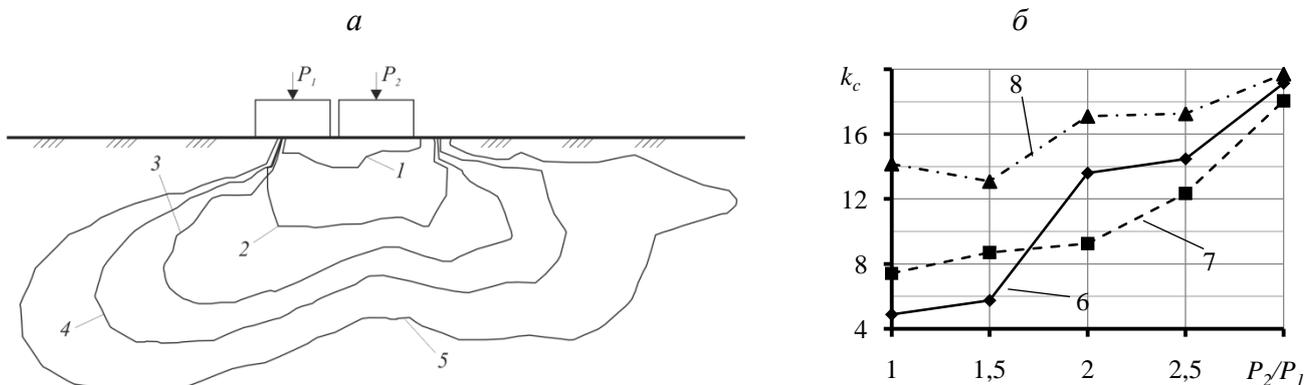


Рис. 9. Форма зон концентрации отрицательных напряжений (а) и зависимость коэффициента концентрации k_c от отношении нагрузок на штампы P_2/P_1 (б) и величины P_1 :
1 — $P_2/P_1 = 1$; 2 — $P_2/P_1 = 1,5$; 3 — $P_2/P_1 = 2$; 4 — $P_2/P_1 = 2,5$; 5 — $P_2/P_1 = 3$;
6 — $P_1 = 40$ кН; 7 — $P_1 = 60$ кН; 8 — $P_1 = 80$ кН

На основании полученных результатов сформулированы второе и третье научные положения.

В четвертой главе изложены результаты разработки и практического применения рекомендаций по укреплению оснований горнотехнических сооружений на основе базовых и локальных геомеханических моделей.

Объектами применения рекомендаций по геомеханическому обоснованию параметров неустойчивых грунтовых оснований являются здания производственного и непромышленного назначения, сооружения горнотехнические, транспортные, энергетические, дамбы, трубы, мачты и др.

Разработанная методика интегрирована в метод геотехногенных блоков, разработанный в НИИ «УралПромСтройНИИПроект» и Институте геологии и геохимии Ур ОАН СССР, основанный на разделении грунтов на 6 типов, квазиоднородных по свойствам: суглинки и глины, неуплотненные, средней и высокой степени уплотнения, насыпные грунты, выветрелые полускальные и трещиноватые скальные породы. Метод геотехногенных блоков включает: выбор глубины погружения инъекторов h , состава раствора и давления, определение диаметра d зоны упрочнения, включающей зоны обжатия, собственно упрочнения, интенсивного упрочнения, опрессования и конечного уплотнения; определение расстояния между инъекторами r при рядовом и кустовом расположении; определение расхода раствора Q , расчет эффективного модуля деформации E_g и геомеханическую проверку запроектированного геотехногенного блока по нормативным критериям.

Суть разработанной методики состоит в детализации геомеханического прогноза с учетом реальной неоднородности свойств грунтов. После определения параметров h , d , r , Q , E_g по базовому методу геотехногенных блоков производят прогноз превышения оседаниями критических нормативных значений с помощью базовой геомеханической модели. На установленных потенциально аварийных участках объекта производят корректирование параметров базовой модели в зависимости от действующих факторов или их сочетания (наличие слабого слоя или ослабленной зоны, асимметричной нагрузки) и производят локальное геомеханическое моделирование для окончательной проверки по нормативным значениям напряжений σ , деформаций ϵ и оседаний Δ (рис. 10).

Разработанная методика геомеханического обоснования технологических параметров укрепления реализована на объектах с насыпными и естественными основаниями.

На угольном разрезе «Краснобродский» при эксплуатации комплекса наклонной сепарации (КНС) вследствие оползневых явлений основания из насыпных вскрышных пород произошло образование ослабленных зон, которые в свою очередь привели к аварийным осадкам оснований приемного бункера и опор галереи (рис. 11, а). Сформированная по данным геологических изысканий с учетом горизонтальной и изгибающей нагрузки базовая геомеханическая модель показала критический уровень оседаний опоры галереи № 11, в том числе и после запроектированного закрепления грунтов.

Локальные геомеханические модели (рис. 11, б) данной опоры в продольном и поперечном направлениях для всех компонентов напряжений и деформаций естест-

венного и закрепленного оснований (рис. 11, в) показали, что несмотря на положительный эффект напорной инъекции в ослабленной зоне они могут существенно возрастать. Рекомендовано максимально увеличить глубину закрепления.

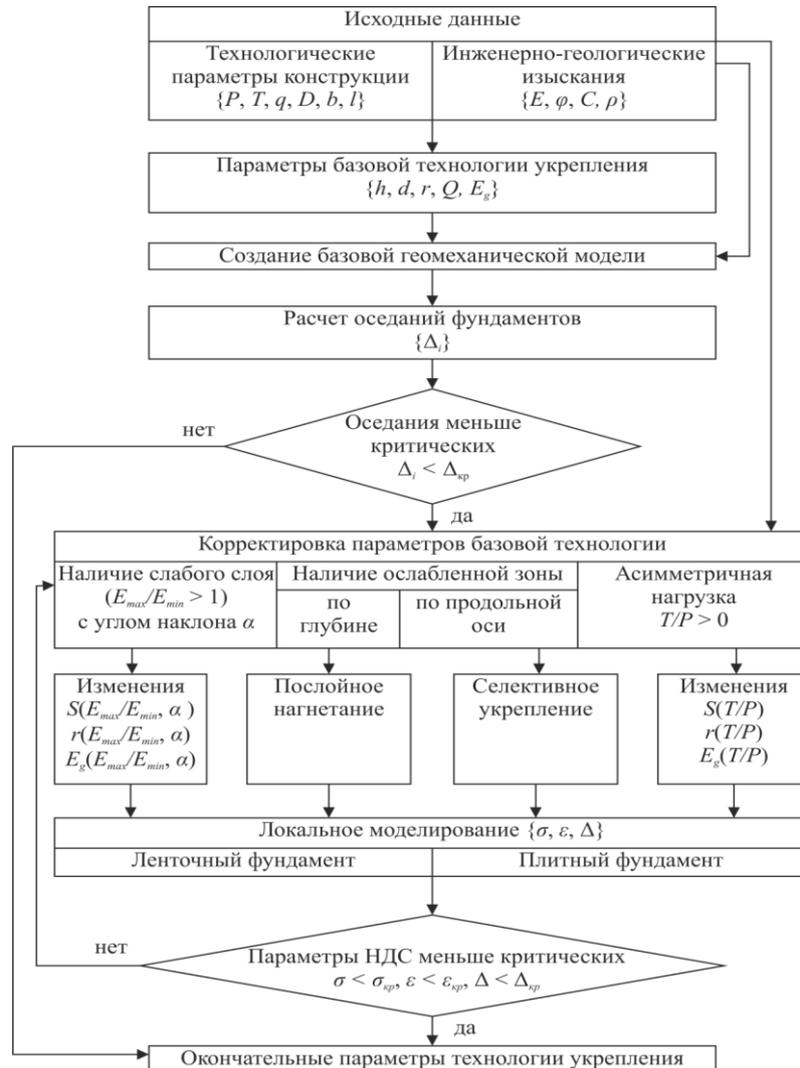


Рис. 10. Алгоритм геомеханического обоснования технологических параметров укрепляемых грунтовых оснований горнотехнических сооружений

Геомеханический прогноз выполнен на объектах с естественными основаниями неоднородного строения.

Проведено сопоставление экспериментальных и расчетных значений оседаний при ликвидации аварийного состояния здания, где были проведены долговременные геодезические наблюдения. В течение 400 сут. зафиксирована неравномерность осадок вдоль оси здания, достигающая 60 %, основной причиной которых являлось замачивание грунтов основания. Геомеханическая модель объекта отражала слоистое строение основания с наличием ослабленной зоны и включала 23 штампа, имитирующих работу фундаментных блоков со швами. Сопоставление расчетных и замеренных значений деформаций показало расхождение от 5 до 25 % при среднем значении 17 %. Рекомендовано селективное укрепление основания, начиная с интервала с наименьшим оседанием.

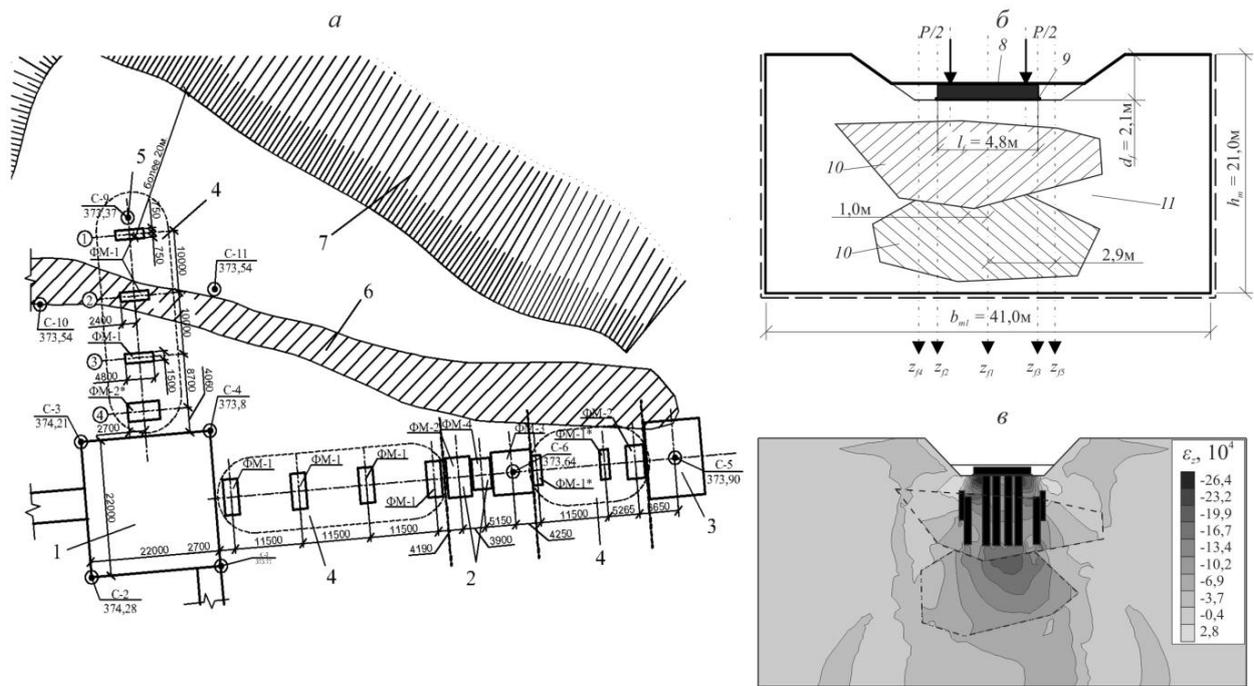


Рис. 11. Схемы исследуемого объекта (а), локальной геомеханической модели (б) и распределения деформаций в искусственном массиве (в):

- 1 – обогатительный корпус; 2 – дробилка и дробильное отделение;
 3 – приемный бункер; 4 – галереи № 11, 5, 9; 5 – геологические скважины;
 6 – зона ослабления грунтов; 7 – откос насыпного основания; 8 – фундамент;
 9 – подготовка; 10 – зоны разуплотнения; 11 – насыпное основание

Основание Г-образного в плане здания осложнено наличием линз водонасыщенных просадочных грунтов (рис. 12, а).

Расчетные значения оседаний по продольным базовым моделям вдоль западного и северного фасадов здания до закрепления показали заметные различия с инструментальными замерами, но для максимальных значений Δ отличия не превышали 20 %, после закрепления среднее отклонение составляет 17 % (рис. 12, б). Локальное моделирование на наиболее проблемном участке основания показало, что в искусственном массиве напряжения распределяются равномернее и на большую глубину (рис. 12, в). Вместе с тем зафиксировано увеличение вертикальных деформаций на отдельных интервалах и знакопеременные горизонтальные деформации, приводящие к изгибу зон укрепления (рис. 12, г). Для стабилизации деформаций предложено провести дополнительное инъецирование с внутренней стороны фундаментов.

Фундамент следующего аварийного объекта по одной из осей располагался над слоем размокаемых грунтов. Расчет по базовым продольной и поперечной моделям показал наличие критических оседаний под осью фундамента, не устраняемых напорным укреплением по базовому проекту. Расчет напряженно-деформированного состояния основания в поперечном осям фундаментов сечения показал высокий уровень остаточных вертикальных и горизонтальных деформаций, для снижения которых рекомендовано провести нагнетание через дополнительные скважины.

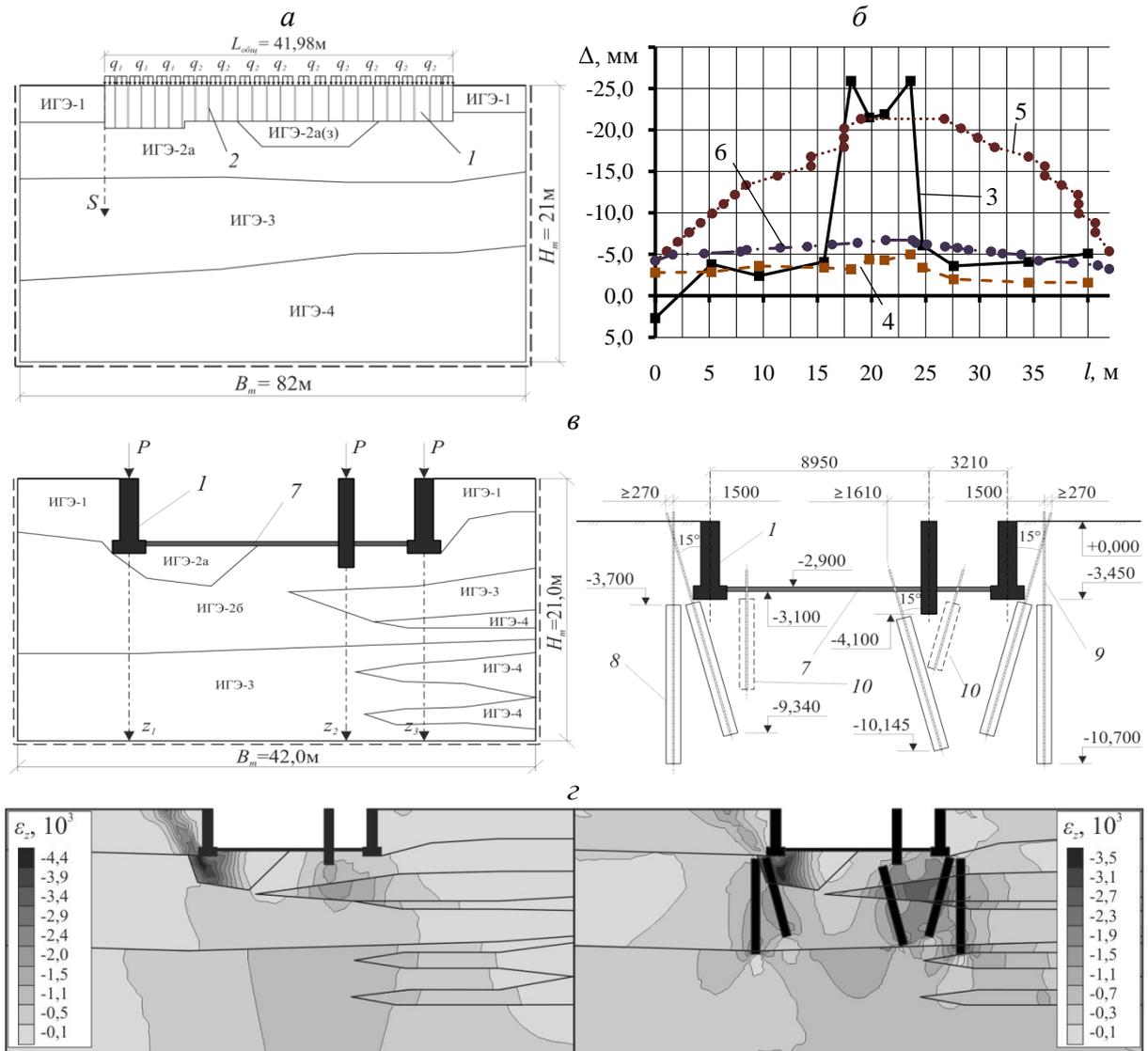


Рис. 12. Схема продольной базовой модели (а), распределения вертикальных оседаний Δ (б) вдоль западного фасада здания, схема поперечной базовой модели закрепления грунтов (в) и поля изолиний вертикальных деформаций ε_z в естественном и искусственном грунтовом массиве (г):

- 1 – фундамент; 2 – модифицированный шов–трещина; 3 – фактические значения до закрепления; 4 – фактические значения после закрепления; 5 – прогнозируемые до закрепления; 6 – прогнозируемые значения после закрепления; 7 – пол подвала; 8 – зона закрепления; 9 – иньектор; 10 – дополнительные зоны закрепления

Разработанные методики и рекомендации направлены на повышение технологической безопасности горно-строительных работ. Экономический эффект от их применения обусловлен возможным снижением объемов маркшейдерско-геодезических наблюдений на аварийных объектах, а также снижением материальных и трудовых затрат не менее чем на 10 %. Экономия при замене инструментальных наблюдений на геомеханический прогноз на одном объекте составит около 40,0 тыс. руб., а при снижении затрат на ремонт укосного надшахтного копра – более 30,0 тыс. руб. в год.

Заключение

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи геомеханического обоснования параметров укрепления неустойчивых грунтовых оснований эксплуатируемых горнотехнических зданий и сооружений, включающее обоснование рациональных параметров компьютерных геомеханических моделей, критериев их анализа, установление закономерностей геомеханических процессов в укрепляемых грунтах при различных геологических и геотехнических условиях, интегрирование геомеханического прогноза в существующие методы расчета параметров укрепления, обеспечивающее повышение устойчивости наземных сооружений, снижение материальных и трудовых затрат, что имеет значение для совершенствования способов и средств освоения недр Земли.

Основные научные, практические результаты и рекомендации сводятся к следующему.

1. Для геомеханического моделирования укрепляемых грунтовых оснований горнотехнических зданий и сооружений целесообразно использовать метод конечных элементов, при этом рациональные диапазоны основных параметров модели целесообразно определять по критерию минимальных погрешностей расчета. При анализе баз данных кроме традиционных критериев в виде расстояний до экстремальных значений напряжений, деформаций и коэффициентов концентрации следует использовать критические границы зон, определенные по классическим критериям устойчивости, и интегральные показатели, учитывающие распределение локальных параметров по интервалам и площадям геомеханических зон. Для расчета рациональных параметров компьютерных моделей зон и интегральных показателей рекомендуется использовать разработанные циклические алгоритмы, компьютерные программы.

2. При закреплении насыпного или влагонасыщенного однородного грунтового основания происходит перераспределение напряжений в более глубокие зоны, при этом величина оседаний грунтов уменьшается с увеличением размеров и площади зон закрепления, расстояния между ними и их относительной жесткости. Зона закрепления как геотехнический элемент работает как балка с жесткой заделкой в прочном грунтовом слое. Дополнительная горизонтальная нагрузка T , возникающая при работе подъемных, вентиляционных механизмов и конвейеров, соизмеримая с вертикальной P , вызывает асимметрию напряжений и деформаций усиливающуюся с увеличением отношения T/P . Зоны упрочнения под ленточным фундаментом с продольной площадью $S_f = 1,8-3,6 \text{ м}^2$ снижают величины интегральных показателей $I_{\sigma z}$ и $I_{\epsilon z}$ на 10–15 %, а $I_{\epsilon x}$ – до 60–70 %, что уменьшает риск потери устойчивости фундамента. В слоистом основании наибольший эффект дает закрепление в нижнем более жестком слое, при котором отношение коэффициентов концентрации напряжений в слабом и сильном слоях снижается более чем в 3 раза, а разность деформаций на границе слоев увеличивается с ростом отношения их модулей деформации E_2/E_1 . Влияние угла наклона слоев в диапазоне $\beta = 0-18^\circ$ на геомеханическое состояние при всех схемах закрепления не превышает погрешности расчета. При не-

равномерном нагружении силами P_1 и P_2 смещения и вертикальные напряжения линейно зависят от соотношения нагрузок P_2/P_1 , формируются горизонтальные напряжения и деформации, асимметрия которых усиливается с ростом P_2/P_1 . В слоистом массиве вертикальные деформации сосредоточены в пределах первого слабого слоя, а горизонтальные локализованы на его границе.

3. Методика геомеханического обоснования параметров укрепления грунтов основана на учете неоднородности их свойств и включает два этапа: прогноз превышения предельных нормативных значений оседаний при параметрах базовой модели, определенных методом геотехногенных блоков «УралПромСтройНИИПроект»; корректирование базовых параметров по результатам локального геомеханического прогноза на потенциально аварийных участках, формирующихся за счет негативного влияния горнотехнических процессов. Разработанная методика реализована при ликвидации аварийных состояний комплекса наклонной сепарации, сооруженного на основании из насыпных скальных пород, и трех зданий с естественными основаниями слоистого строения, сложенными просадочными и влагонасыщенными грунтами. Рекомендованные меры по изменению параметров укрепления на этих объектах состоят в следующем: увеличение глубины инъекции; устройство дополнительных инъекционных скважин; переход на технологию селективного укрепления.

4. Кроме повышения безопасности горно-строительных работ применение разработанных методик и рекомендаций обеспечивает экономию трудовых и материальных затрат за счет снижения необходимых объемов маркшейдерско-геодезических измерений и увеличения межремонтных сроков при эксплуатации объектов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

в изданиях, рекомендованных в ВАК РФ:

1. **Соколов, М. В.** Исследование влияния закрепления грунтового основания на напряженно-деформированное состояние / **М. В. Соколов**, С. М. Простов // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 1. – С.7–10.

2. Простов, С. М. Анализ напряженно-деформированного состояния укрепляемого однородного грунтового основания на основе интегральных критериев / С. М. Простов, **М. В. Соколов** // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 6. – С.52–61.

3. **Соколов, М. В.** Моделирование геомеханических процессов при неравномерном оседании оснований сооружений / **М. В. Соколов**, С. М. Простов // Вестник КузГТУ. – 2017. – № 1. – С.15–25.

4. **Соколов, М. В.** Геомеханическое обоснование параметров инъекционного закрепления насыпного грунтового основания комплекса наклонной сепарации / **М. В. Соколов**, С. М. Простов // Вестник КузГТУ. – 2017. – № 2. – С.5–20.

5. **Соколов, М. В.** Геомеханическое обоснование параметров инъекционного закрепления неоднородного неустойчивого грунтового основания здания / **М. В. Соколов**, С. М. Простов // Вестник КузГТУ. – 2017. – № 3. – С.37–44.

6. **Соколов, М. В.** Геомеханическое обоснование параметров инъекционного закрепления аварийного грунтового основания здания / **М. В. Соколов**, С. М. Простов // Вестник КузГТУ. – 2017. – № 4. – С.5–13.

в прочих изданиях:

7. Sergei M. Prostov, **Mikhail V. Sokolov**. *Simulation of stress-strain state of the reinforced soil foundation for structures*. Taishan Academic Forum - Project on Mine Disaster Prevention and Control, October 17-20, Qingdao, China. 2014. pp.350–355. (статья индексирована в международных базах Web of Science, Scopus)

8. Простов, С. М. Моделирование напряженно-деформированного состояния укрепляемых грунтовых оснований сооружений / С. М. Простов, **М. В. Соколов** // Сборник трудов всероссийской научной конференции «Горняцкая смена 2015». – Новосибирск. – 2015. – С.145–152.

9. Sergei M. Prostov, **Mikhail V. Sokolov** and Andrey V. Pokatilov. *The Influence Of Injecting Strengthening For Uniform Subgrade Soils Of Strip Foundations On Their Stress-Strain State*. International Journal of Applied Engineering Research. Volume 10. Number 25. 2015. pp.45297–45306. (статья индексирована в международной базе Scopus)

10. **Соколов, М. В.** Анализ влияния горизонтальной нагрузки на напряженно-деформированное состояние искусственных грунтовых оснований сооружений // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: научный журнал. – Сибирский государственный индустриальный университет; под общей ред. В. Н. Фрянова. – Новокузнецк. – 2016. – № 2.– С.128–136.

11. **Mikhail Sokolov**, Sergey Prostov. *Modeling of Geomechanical Processes Case of Uneven Settling of Foundations Constructions*. Proceedings of the 8th Russian-Chinese Symposium “Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety”. Advances in Engineering Research. September (2016). Volume 92. pp.206–212. (статья индексирована в международных базах Web of Science, Scopus)

12. **Соколов, М. В.** Влияние слоистости на напряженно-деформированное состояние укрепленного грунтового массива. / **М. В. Соколов**, С. М. Простов // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2016. Материалы XVI Международной научно-практической конференции. – Кемерово, 2016.

13. **Mikhail V. Sokolov**, Sergey M. Prostov and Viktor S. Zykov. The study of stress-strain state of stabilized layered soil foundations. E3S Web Conferences. Volume 15. 2017. (статья индексирована в международной базе Scopus)

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611451. Программа для определения интегрального показателя изменения напряженно-деформированного состояния укрепляемых грунтовых оснований. / **М. В. Соколов**, С. М. Простов; Заявл. 02.03.15; № 2015611173; Зарегист. 17.04.2015.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611668. Программа для построения зон напряженно-деформированного состояния укрепляемых грунтовых оснований зданий и сооружений. / **М. В. Соколов**, С. М. Простов; Заявл. 10.03.15; № 2015611585; Зарегист. 23.04.2015.

Подписано в печать 02.07.2018. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Печ. л. 1,2. Тираж 100 экз. Заказ № 354

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»
КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский Центр УИП КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а