

На правах рукописи



ДИНЬ ТХЕ ХИЕН

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ
ДЕФОРМАЦИЙ ЗАЩИТНЫХ ДАМБ Р. КРАСНОЙ В ХАНОЕ
(ВЬЕТНАМ)**

Специальность 25.00.08 – инженерная геология,
мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

МОСКВА – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ).

Научный **Вязкова Ольга Евгеньевна**

руководитель: доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор кафедры инженерной геологии ФГБОУ ВО «Российский Государственный Геологоразведочный Университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ)

Научный **Фоменко Игорь Константинович**

консультант: доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор кафедры инженерной геологии ФГБОУ ВО «Российский Государственный Геологоразведочный Университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ)

Официальные **Строкова Людмила Александровна**

оппоненты: доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор Отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета

Бондарик Ирина Генриховна

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник федерального государственного бюджетного научного учреждения "Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова"

Ведущая **Федеральное государственное бюджетное учреждение**
организация: «Гидроспецгеология»

Защита диссертации состоится «24» июня 2021 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.121.01 при ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, зал диссертационных советов (каб. 4-73).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на сайте Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, <http://mgri.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.212.121.01



О.Е. Вязкова

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Ханой – город, расположенный в дельте реки Сонг Хонг (р. Красная). Столица современного Вьетнама с тысячелетней историей, за время своего существования претерпела значительные изменения инженерно-геологических условий природного и техногенного характера.

Приречные территории Ханоя являются особо ценными участками в различных аспектах градостроительства: функционально-планировочном, рекреационном и ландшафтно-композиционном. В новых социально-политических условиях переходной экономики Вьетнама преобразования приречных территорий приобретают большое значение как для самого города Ханоя, так и для Вьетнама в целом. Особая роль при этом отводится системе дамб вдоль реки Красной, защищающих город от наводнений. За продолжительную историю строительства и эксплуатации дамб в Ханое известно немало случаев их повреждения и разрушения, повлекших наводнения и разрушения городской инфраструктуры. Например, прорывы дамб на периферии Ханоя в 1971 и 1986 гг. (уровень воды в реке достиг 14,13 м и 12,35 м, соответственно) принести народному хозяйству большие материальные потери и нарушили нормальную жизнь миллионов местных жителей.

Согласно планам развития Ханоя, наряду с существующей системой дамб, планируется возведение новых защитных сооружений для обеспечения нормального функционирования приречных территорий. Поэтому особую актуальность приобретает решение задач по анализу условий и причин деформаций и разрушения дамб, защищающих Ханой от наводнений.

Целью работы является выявление условий, причин и механизмов деформирования дамбы вдоль берегов р. Красной и оценка устойчивости сооружения на основе математического моделирования.

Основными задачами исследования являлись:

1. Оценка роли компонентов инженерно-геологических условий района расположения дамб в возникновении аварийных ситуаций.
2. Типизация геологического строения грунтов, слагающих основание дамб.
3. Установление причин и механизмов разрушения дамбы р. Красной.
4. Математическое моделирование устойчивости дамбы в различных условиях.
5. Анализ применимости технических решений по увеличению устойчивости дамбы и обоснование их эффективности методами математического моделирования.

Объектом исследования являются экзогенные и инженерно-геологические процессы, влияющие на надежность эксплуатации защитной дамбы на берегах Красной реки.

Фактический материал собран автором за 7 лет работы в научных организациях Ханоя. В составе полученной информации сведения о климатических параметрах района, величине и закономерностям развития

паводков на реке Красной, исторические сведения о строительстве защитной дамбы, фактология формирования деформаций тела дамбы.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использованы следующие методы:

- + сбор фактического материала, характеризующего природные особенности и инженерно-геологические условия исследуемой области;
- + историко-геологический метод при изучении инженерно-геологических условий;
- + математическое моделирование: оценка устойчивости склонов и откосов; количественный анализ для выявления вклада различных процессов в разрушение дамб;
- + метод системного анализа для выявления условий, которые влияют на разрушение дамб;
- + метод статистической обработки: обработка и синтез экспериментальных результатов;
- + математическое моделирование с целью обоснования защитных мероприятий.

Научная новизна:

1. Выполнена типизация геологического строения грунтов основания дамбы р. Красной, определяющая механизмы ее деформирования и разрушения.
2. Апробирована методика оценки снижения устойчивости внешнего откоса дамбы за счёт быстрой сработки уровня паводковых вод.
3. Методами математического моделирования выявлены закономерности изменения устойчивости внутреннего откоса дамбы во времени в период паводка и с учетом геологического строения грунтов, слагающих основание дамбы.
4. Установлены причины образования поперечных трещин в теле дамбы в условиях неуставившегося режима функционирования ПТС как результат неравномерных осадок сооружения вследствие перманентной его реконструкции и продолжающейся консолидации слабых грунтов основания.
5. На основе метода случайных предельных равновесий выполнена оценка влияния неоднородности грунтов, слагающих тело дамбы на ее устойчивость.
6. Выявлены условия и причины разрушения природных берегов Красной реки в связи с паводками.
7. Выполнены расчеты, позволяющие обосновать комплекс защитных мероприятий.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Результаты выполненного исследования могут быть применены на практике при проектировании, строительстве и реконструкции дамбы. На основе математического моделирования возможно оценивать формирование дефицита устойчивости дамб в типовых условиях, что позволит в дальнейшем принимать экономически целесообразные решения для конкретных участков дамбы с учетом фактического геологического строения.

Защищаемые положения

1. Структура локальной ПТС «Дамба р. Красной» по характеру взаимодействий сооружения с геологической средой разделяется на подсистемы: тело дамбы и сфера ее взаимодействия, Механизм процессов, протекающих в ПТС, обусловлен строением земляной дамбы, особенностями инженерно-геологических условий и гидрологического режима реки.

2. Функционирование ПТС «Дамба р. Красной» осложнено парагенезисом инженерно-геологических процессов, развивающихся в результате периодических высоких паводков, характерных для тропического климата: оползнями на откосах дамбы; фильтрационными деформациями; неравномерной осадкой и деформациями тела дамбы; эрозионно-оползневым разрушением фрагментов естественного берега реки.

3. Разработка управляющих решений по устойчивому функционированию линейной ПТС «Дамба р. Красной» должно базироваться на инженерно-геологической типизации сферы взаимодействия и прогнозе развития инженерно-геологических процессов, основанном на математическом моделировании.

Личный вклад автора:

Работа выполнялась автором, начиная с 2018 года, на кафедре инженерной геологии Гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. С. Орджоникидзе (МГРИ) во время обучения в аспирантуре. В ее основу положены материалы, полученные лично автором за 3-летний (2007–2010 гг.) период работы в Институте геологических наук Вьетнамской академии наук и технологии, и 4-летний (2010–2014 гг.) период работы в Институте науки и строительной техники в Ханое.

Достоверность научных положений и выводов обосновывается качеством первичной инженерно-геологической информации и применением комплекса современных методов математического моделирования при оценке устойчивости откосов дамбы и моделировании осадки ее основания.

Апробация результатов исследования

По теме диссертации опубликовано 3 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК. Автор участвовал конференциях: «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, 2019 г., 2021 г.) и «Молодые – Научкам о Земле» (Москва, 2020 г.).

Структура и объем работы. Работа включает введение, 4 главы и заключение. Общий объем диссертации составляет 149 страниц, включая 54 рисунка и 14 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д. г.-м. н., проф. О.Е. Вязковой за формирование научных взглядов, общее руководство работой и полезные идеи, научному консультанту д. г.-м. н., проф. И.К. Фоменко за формирование навыков математического моделирования, а также д. г.-м. н., проф. Д.С. Дроздову и Л.А. Ярг за ценные советы и всему профессорско-преподавательскому составу кафедры инженерной геологии РГГРУ-МГРИ за консультации в процессе написания работы.

Автор также выражает благодарность проф. Т.Т. Доан, директору Института науки и строительной технологии Вьетнама и проф. В.Т. Чан,

директору Института геологических наук Вьетнамской академии наук и технологии, за помощь во время выполнения диссертации.

1. ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ ЗАЩИТНЫХ ДАМБ

Опыт исследования и эксплуатации защитных дамб в мировой практике

Многие крупные города и страны мира в силу разных причин вынуждены защищать свою территорию от пагубных наводнений. За последние 100 лет произошли катастрофы в Голландии (1953 г.), Новом Орлеане (ураган Катрина 2005 г.), которые заставили ученых по-иному смотреть на проблемы освоения потенциально затопляемых территорий. Гибель тысяч людей за считанные дни, огромный экономический ущерб побуждают активнее разрабатывать различные аспекты эксплуатации защитных дамб на побережьях рек и морей. В решении этой проблемы заинтересованы многие развитые страны мира, такие как Нидерланды, Германия, США, Япония, Россия и т. д.

Нидерланды обладают большой площадью, находящейся ниже уровня моря. Программу возведения дамб и сооружений для предотвращения наводнений начали после исторического наводнения в 1953 году (Delta program). В 2005 году в рамках программы (VNK05) Нидерланды провели серьезную переоценку безопасности средств защиты от наводнений в условиях изменения климата.

В США исследовательские программы связаны с водохранилищами, в том числе на реках Миссисипи, Аризона, Сакраменто и др. для изучения их совместной эксплуатации. Инженерные войска США (USACE) представляют собой ядро углубленных исследований проблем безопасности дамб, результаты которых входят в состав технических норм, используемых в проектировании и возведении дамб.

В Нидерландах, а также в других странах ЕС, таких как Германия, Великобритания, Бельгия, Италия и др. многие фундаментальные и прикладные исследования проведены для решения конкретных проблем, которые касаются проектирования и возведения дамб в двух направлениях.

Первая группа исследований, посвященная методологии оценки безопасности сооружения по предотвращению наводнений, была проведена в Нидерландах с 1960-х годов, а затем в странах Северо-Западной и Южной Европы. Основой этих методов является разработка теории надежности и анализа рисков в проблеме наводнения, исходя из неопределенности входных переменных, неопределенности расчетной модели, а также человеческого фактора.

Вторая группа исследований сосредоточила внимание на наиболее распространенных процессах. Суффозия в основании речной дамбы и устойчивость системы морских дамб являются наиболее актуальными вопросами, на которые обращали внимание ученые.

Наиболее важный вклад в эти исследования внесли Блай В.Г. (Bligh W.G.), Лейн Е.В. (Lane E.W.), Селлмейер (Sellmeijer J.B., 1988), Вера Ван (Vera Van, 2011), Шмертман (Schmertmann, 2000), Ван (Wan) и Фелл (Fell).

В России вопросами развития суффозии занимались Ломтадзе В.Д., Мироненко В.М., Секстаков А.Н., Патрусов Л.И., Козлова В.Х., Истомина В.С., Хоменко В.П. и т. д.

Исследования устойчивости защитных дамб во Вьетнаме

В соответствии с общемировой тенденцией во Вьетнаме к исследованию устойчивости дамб привлекается большое внимание. Нгуен Ч.Й. (1985) обсуждает современные тектонические движения и тектонические структуры по руслу р. Красной. Автор опубликовал геодинамические характеристики современной территории Северного Вьетнама.

Устойчивость основания дамбы в Северной Дельте изучал автор Ван Д.Ч. в 1999 г., который показал, что она связана с наличием «слабых» слоев в геологическом строении. Согласно этому исследованию, в местах, где основание дамбы имеет в разрезе слабые грунтовые слои с большой мощностью (мощность текучих глины или суглинка более 10 м), возникают оползни откоса дамбы. Фам Х.Т., Нгуен Д.Д. и Као Д.Д. показали, что эрозия берегов реки влияет на устойчивость и морфологию берега реки.

Для обоснования математических моделей гидродинамического потока, влияющего на устойчивость берега реки или гидротехнических сооружений (дамб, набережных рек и т.п.), автор Фам Д. изучал физическую модель мер защиты берега от эрозии в районе Фугия в Ханое. Автор сделал некоторые выводы на основании анализа поведения физических моделей, которые показывали взаимосвязь скорости потока со скоростью эрозии берега и помогали разрабатывать меры для предотвращения эрозии берегов реки.

Под влиянием скорости потока морфология русла реки изменяется, в 1995 г. Ву Т.Й. предложил математическое моделирование для изучения изменения русла р. Красной от Сонтай до Ханоя. Автор создал прогнозную модель изменения русла реки и ее морфологию в соответствии со скоростью эрозии берегов реки. В 2010 г. Луонг Ф.Х. проводил изучение гидродинамической модели потока, влияющего на берег реки и гидротехнические сооружения с целью принятия научно-технических решений для регулирования потока в важных местах Южной и Северной равнины. Эти авторы указали влияние потока воды в сезоны дождей на берега рек, дамбы и набережные рек.

Многие авторы обращали свое внимание на комплексное изучение геологических процессов, вызывавших катастрофы в прибрежных районах рек. В 2004 году автор Чан Ч.Х. опубликовал общую оценку различных типов геологических рисков на территории Вьетнама и предложил решения для их профилактики. Автор сосредотачивается в основном на статистике и зонировании территории по возможности возникновения геологических процессов. Кроме того, он оценивает некоторые их причины, таких как: добыча

песка, приводящая к изменению русла реки, строительство вдоль берега реки, изменение направления потока и т. д.

В 2012 году Чан В.Т. изучил и оценил инженерно-геологические условия и спрогнозировал развитие геологических процессов, которые возможно произойдут вдоль дамб Красной реки на территории города Ханоя. В этом исследовании автор указал, что скорость оседания дамбы зависит от деформационных характеристик некоторых типов грунтов четвертичного возраста. В 2013 г. он провел еще несколько исследований фильтрационных процессов в основании дамбы в районах Фуктхо и Данфыонг в Ханое и указал, что оседание поверхности земли происходит из-за добычи подземных вод и это основная причина деформации дамбы.

В ходе изучения фильтрации в 2014 г. Чан В.Т. и Ву К.М. предложили несколько моделей для определения давления подземных вод под дамбой в Ханое с помощью устройства измерения давления в скважине.

Современные проблемы функционирования ПТС «Дамба р. Красной»

Чан Ч.К. и Чан В.Т. связывают процесс формирования и строительства системы защитной дамбы с историей развития всего города Ханой и разделяют на следующие этапы:

- В феодальных династиях дамбы вдоль крупных рек еще не сформировались, а существовали в форме отдельных небольших насыпей, причем берег реки служил местной границей для узкого круга племен.

- В марте 1108 года первая дамба была возведена в районе Коса для защиты цитадели Тханглонг (от Нгитам до Тханьчи) во времена династии Ли.

- В 1248 году во время правления династии Чан уровень воды р. Красной резко поднялся и вызвал наводнение во внутренней части города Ханой. Правитель приказал провинциям по обоим берегам р. Красной от верховьев до моря построить дамбы для предотвращения наводнений.

- Нгуен В.Л. и Ву Т.К. сообщают, что во время династии Ле (1428–1527 гг.) были построены более крупные дамбы на основе старой системы, так как р. Красная ее разрушила и вызывала постоянные наводнения.

- В 1873 году французские колонизаторы захватили Ханой, но только в 1908–1945 гг. их инженеры организовали крупную реконструкцию дамбы.

В таблице 1 указаны годы реконструкций дамбы для противодействия наводнениям с начала XX века по настоящее время.

Таблица 1. Поэтапное увеличение высоты дамбы Красной реки

Года	Высота дамбы (м)
1909	10,5
1915	11,20
1920	11,50
1923	12,00
1924	12,80
1932	13,90
1945	15,50
Настоящее время	20,0

За последние 10 лет министерство сельского хозяйства Вьетнама и города Ханой реконструировали дамбу р. Красной для повышения ее эффективности в защите города от наводнений в сезоны дождей.

По итогам реконструкции сооружение имеет следующие параметры: длина правобережной дамбы составляет 120 км, левобережной – 60 км. В последние годы гребень обеих дамб, имеющий ширину около 10 м, для защиты от воздействия воды был заасфальтирован, а высота увеличена до среднего уровня +20,0 м. Ширина дамбы по подошве достигает 110 м. Внешние откосы (ориентированные в сторону реки) имеют заложение $m = 1 : 2$, а внутренние (направленные в сторону города) – $m = 1 : 3$. На некоторых участках внешние откосы были отремонтированы путем применения противоволновых мер, а внутренние – засажены травой. Поперечный разрез дамбы с указанием постепенного увеличения ее высоты показан на рисунке 1. Расположение дамб показано на рисунке 2. Несмотря на длительное поэтапное доведение дамбы до современных отметок, в сезон дождей при наводнениях в различных местах происходят ее деформации различного характера.

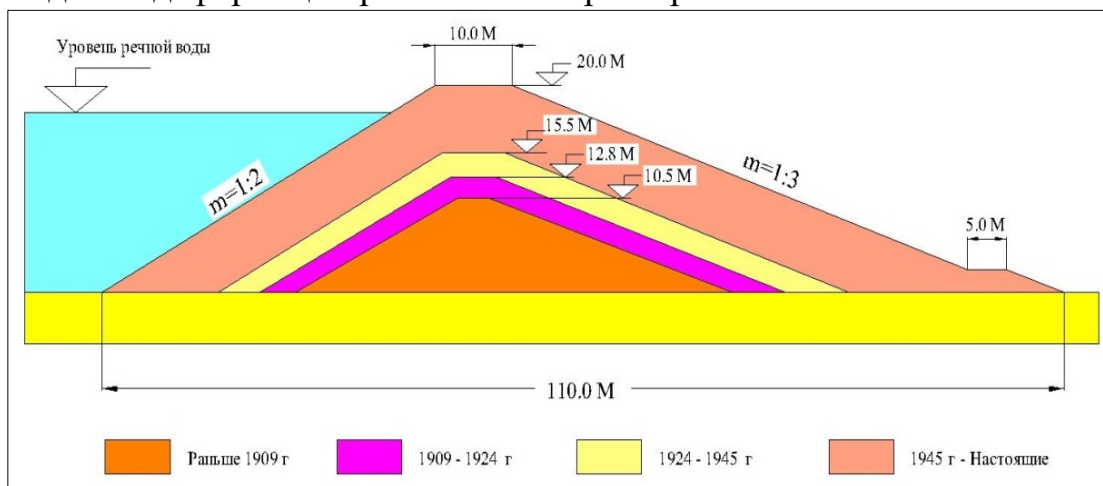


Рисунок 1. Схема поперечного сечения дамбы

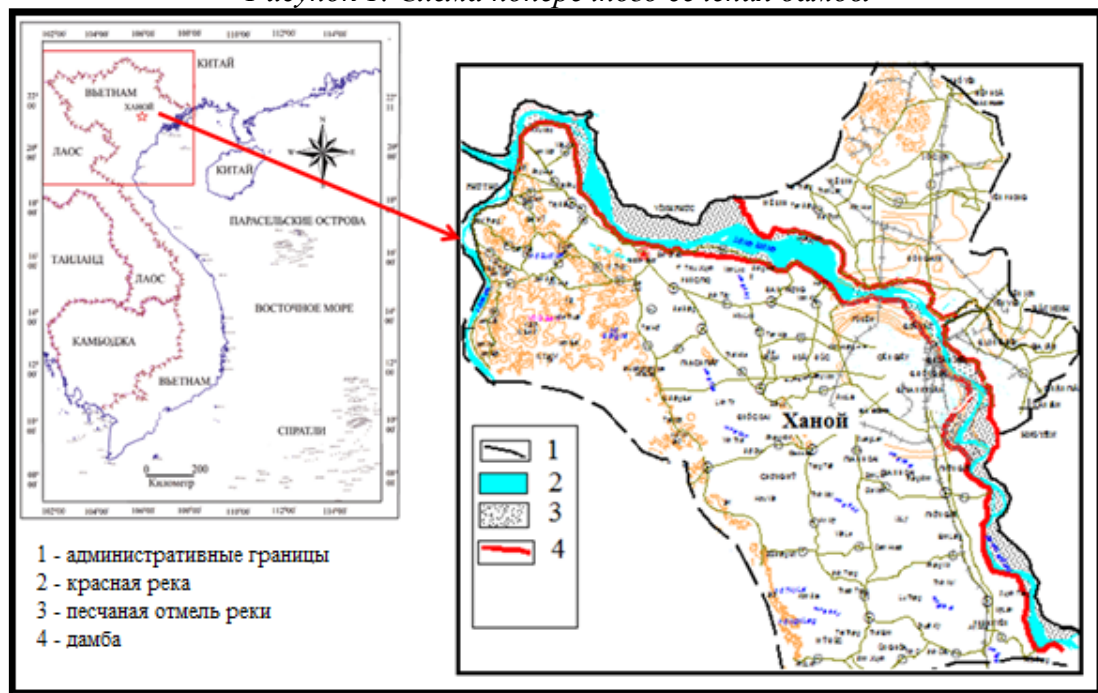


Рисунок 2. Схема расположения защитных дамб на р. Красной

2. ИНЖЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПОБЕРЕЖИЙ Р. КРАСНОЙ И ИХ ТИПИЗАЦИЯ

Инженерно-геологические условия на приречной территории Ханоя обладают рядом важных особенностей и большой изменчивостью, которые в совокупности определяют сложность эксплуатации очень протяженной системы защитных дамб.

Климат в районе исследований тропический с явно выраженным сезоном дождей (с мая по сентябрь), когда выпадает до 65–70% годового количества осадков, которое колеблется от 1169,8 мм (2010 г.) до 2254,70 мм (2012 г.), составляя в среднем 1576,23 мм. Величина испарения достигает 60% от суммы выпадающих осадков. Этому способствует температура воздуха, которая в Ханое очень мало меняется в течение года (среднемесячная температура варьирует от 17,8°C до 29,7°C.), в среднем составляя 24,3°C.

Ханой расположен в дельтовой части крупной р. Красной, которая начинается в Китае и продолжается во Вьетнаме, протекая через несколько северных провинций страны, а затем впадает в Тонкинский залив Южно-Китайского моря. В черте Ханоя река принимает полноводные притоки Да, Дуонг и Ло. В сезон дождей на реке возникает паводок высотой до 18–19 м.

При очень низменном, плоском рельефе с абсолютными отметками 5–10 м такие паводки приводят к наводнениям и большому экономическому ущербу в местах прорыва защитной дамбы. Она построена за 4 этапа в течение последних 900 лет. К настоящему времени ее высота практически повсеместно доведена до отметки +20,0 м.

Геологическое строение побережий р. Красной в Ханое, на которых расположены защитные дамбы, характерно для дельтовых областей и чрезвычайно сложно из-за присутствия в верхних частях разреза часто изменяющихся по мощности и составу песчаных и слабых глинистых грунтов, принадлежащих голоценовым свитам Тхайбинь и Хайхынг аллювиального, озерного и болотного генезиса.

Регион Ханоя является местом расположения крупнейших разломов (разлом р. Красной и разлом р. Ло). Эти разломы сопровождаются широким развитием геодинамических процессов, которые описываются в научных работах вьетнамских и зарубежных авторов, таких как Н.Ч. Ием, З.Д. Лам, Д.Д. Бак, Н.К. Тоан и Х.В. Хай, С.И. Шермана, К.Ж. Семинско. По некоторым активным разломам, наблюдаются смещения до 5 мм, редко до 8 мм в год (В.Д. Чыонг и др., 1993; Н.Д. Суен и др., 1985, 1989, 2003).

Результаты их исследований позволяют предположить, что история формирования бассейна р. Красной связана с деятельностью различных систем разломов, которые вызывают оседание с различными амплитудами, что создало условия накопления мощной толщи четвертичных отложений.

Северный Вьетнам в целом и Ханой в частности имеют довольно высокую сейсмическую активность. Согласно результатам Института геофизических исследований (г. Ханой) находится в области, где землетрясения обычно достигают 6 баллов по шкале Рихтера при глубине залегания очага 15–20 км.

Результаты микросейсмического районирования показывают, что в городе на различных участках в зависимости от особенностей геологического строения, возможны землетрясения от 7 до 8–9 баллов по шкале Рихтера.

Следствием большой пестроты и изменчивости гранулометрического состава четвертичных аллювиальных отложений является неоднородность и невыдержанность гидрогеологических условий в области расположения дамб. В целом выделяется два водоносных горизонта: голоценовый (имеющий прерывистое распространение) и плейстоценовый (распространенный повсеместно).

Горизонты имеют гидравлическую связь как между собой через литологические окна, так и с рекой. Именно это обуславливает формирование в них разнонаправленных в течение года фильтрационных потоков в горизонтах. В паводок вода под влиянием больших гидравлических градиентов устремляется на защищенную территорию города. В колодцах и скважинах при этом начинает наблюдаться самоизлив, что в ряде случаев приводит к формированию плывунов, разрушающих колодцы. Устойчивость дамбы при этом очень сильно зависит от наличия и мощности глинистого водоупорного слоя над первым водоносным горизонтом, чем мощность больше, тем лучше. Интенсивность и ежегодная повторяемость разнонаправленной фильтрации приводит к развитию суффозии, плывунов, влияет на устойчивость откосов дамб.

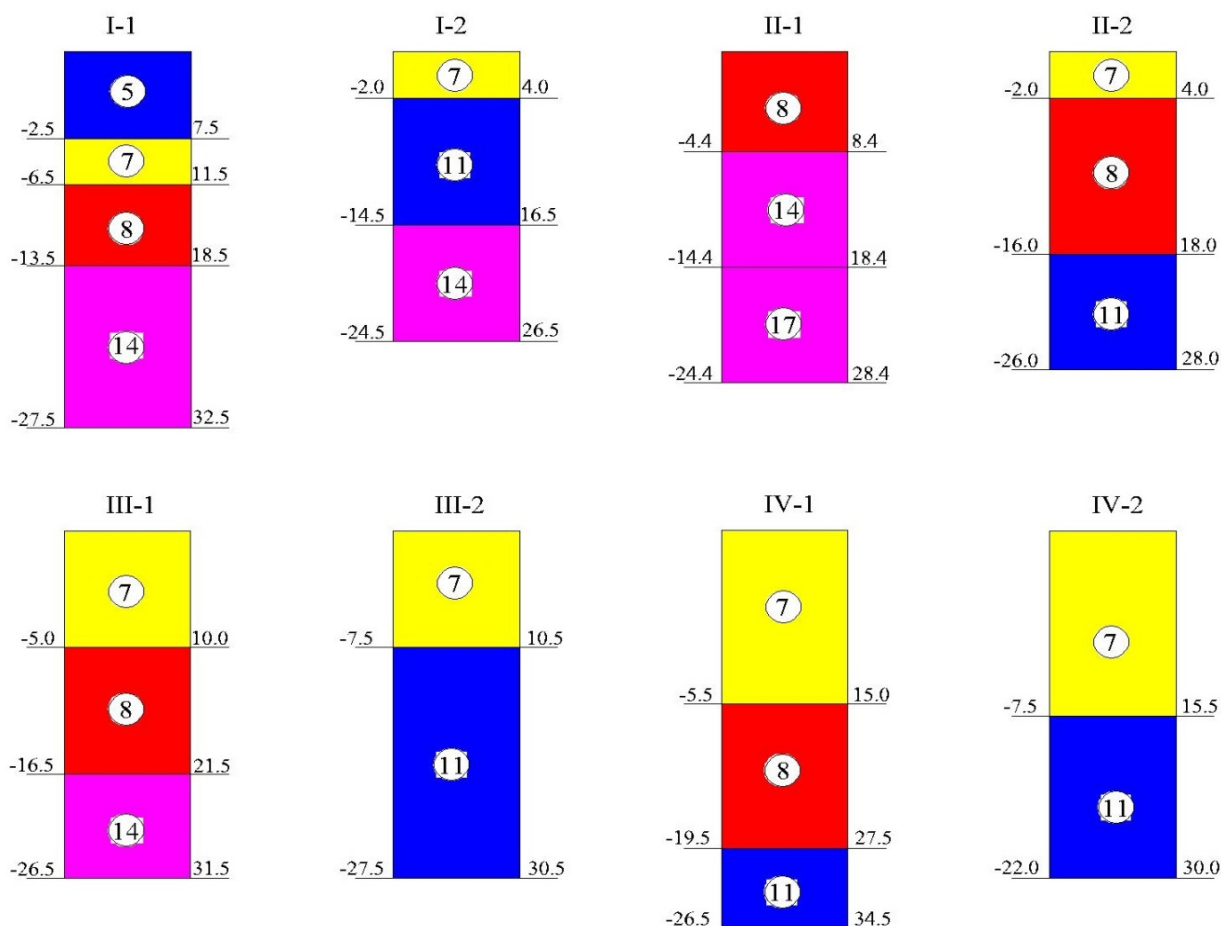
Оба водоносные горизонта имеют воду хорошего качества. Голоценовый горизонт в целях водоснабжения использует местное население с помощью колодцев, а плейстоценовый – централизованно для всего города.

По составу и свойствам на всем протяжении дамб выделено 20 слоев, построен инженерно-геологический разрез, анализ которого позволил автору выделить в строении сферы взаимодействия дамбы 8 типов геологических разрезов, объединенных в 4 класса (рис. 3, табл. 2). Характеристика каждого из них позволила выявить обусловленность протекания определенного парагенезиса инженерно-геологических процессов, типом геологического разреза.

Их наличие в геологическом строении является основной причиной развития экзогенных и инженерно-геологических процессов (плывуны, суффозия, фильтрация через основание и оползневой процесс в теле дамбы, неравномерная осадка дамбы, оползни в природных берегах). Если слои слабых грунтов залегают в приповерхностной зоне (глубина < 5 м), это будет угрожать устойчивости дамбы.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПТС «ДАМБА Р.КРАСНОЙ»

В фильтрационных расчетах метод конечных элементов позволяет решать задачи со сложными фильтрационными параметрами и граничными условиями. В этом исследовании, при решении задач фильтрации автор использовал модуль SEEP/W (из программного комплекса GEO-STUDIO).



Типы разреза: I-1 (на 17 км); I-2 (на 95,3 км); II-1 (на 79 км); II-2 (на 10,3 км)
 III-1 (на 82,5 км); III-2 (на 110 км); IV-1 (на 25 км); IV-2 (на 80 км)

5 – песок свиты Тхайбинь

11 – песок свиты Тхайбинь

7 – полутвердая глина свиты Тхайбинь

14 – полутвердая глина свиты Виньфук

8 – слабая глина свиты Тхайбинь

17 – песок свиты Виньфук

Рисунок 3. Характерные типы геологических разрезов вдоль дамбы р. Красной

Таблица 2. Типизация геологического строения основания дамбы р. Красной в Ханое

Класс	Тип	Характеристика
I	I-1	Дамба расположена непосредственно на мелкозернистых песках
	I-2	Дамба расположена на глинистых или суглинистых грунтах твердой или полутвердой консистенции (мощностью менее 5 м), ниже них залегает песок
II	II-1	Дамба расположена непосредственно на слабых грунтах (глина и суглинок текучей, текучепластичной консистенции)
	II-2	Дамба расположена на глинистых или суглинистых грунтах твердой или полутвердой консистенции (мощностью менее 5 м), ниже залегает слабый грунт
III	III-1	Дамба расположена непосредственно на глинистых или суглинистых грунтах твердой или полутвердой консистенции. (мощностью 5,0–10,0 м), ниже – песок
	III-2	Дамба расположена непосредственно на глинистых или суглинистых грунтах твердой или полутвердой консистенции (мощностью 5,0–10,0 м), ниже – слабый грунт
IV	IV-1	Дамба расположена непосредственно на глинистых или суглинистых грунтах твердой или полутвердой консистенции (мощностью более 10,0 м), ниже – песок
	IV-2	Дамба расположена непосредственно на глинистых или суглинистых грунтах твердой или полутвердой консистенции (мощностью более 10,0 м), ниже – слабый грунт

При расчете устойчивости откосов дамбы и берегов р. Красная был использован метод предельного равновесия Моргенштерна и Прайса (1965). Формулировка метода основана на двух уравнениях для определения коэффициента устойчивости. Одно из уравнений удовлетворяет общему равновесию моментов (F_m), другое – общему равновесию сил (F_f). В этом исследовании, при решении задач фильтрации автор использовал модуль SLOPE/W (из программного комплекса GEO-STUDIO).

Существует много способов решения задачи осадки основания под фундаментом сооружения, но в настоящее время наиболее часто используются численные методы (конечных элементов, граничных элементов и метод конечных разностей). Эти методы используются как для решения задачи осадки во времени (за счет первичной (фильтрационной) и вторичной (ползучести) консолидации), так для расчета конечной осадки. В этом исследовании, автор использовал модуль SIGMA/W (из программного комплекса GEO-STUDIO) и программу RS 2.

Механизмы разрушения берегов Красной реки

Естественные берега реки разрушаются парагенезисом эрозии, суффозии и оползней.

Влияние геологического строения на устойчивость берега реки

Берега реки обладают сильной изменчивостью геологического строения верхней части разреза и устойчивости к речной эрозии. Устойчивость берега реки на каждом его участке зависит от состава, физико-механических свойств и мощности грунтов, которые слагают тот или иной участок берега.

Для оценки влияния такого геологического строения на устойчивость береговых склонов р. Красной был выполнен ее вероятностный анализ, который показал, что несмотря на общую устойчивость (средний $K_y=1,17$), вероятность обрушения берега за счет изменчивости прочностных свойств грунтов, составляет 14%. При этом, наибольшее влияние на устойчивость оказывает изменчивость угла внутреннего трения песков.

Влияние гидрогеологического и гидрологического режима на устойчивость берега реки

На эрозию и разрушение берега влияют изменения динамики грунтовых и поверхностных вод во время паводков и засушливых сезонов. Поток в сезон паводков имеет более высокую скорость, чем поток в сухой сезон ($V_{\text{паводка}} = 1,38 \text{ м/с} > V_{\text{межень}} = 0,66 \text{ м/с}$), поэтому он в сезон дождей вызывает эрозию берега сильнее. Режим осадков в разные сезоны изменяет физико-механические свойства грунтов, скорость поверхностного и подземного стоков и т. д. Изменение уровня реки с течением времени вызывает суффозию, создает динамичный фильтрационный поток в грунте, вызывает попеременное насыщение и обезвоживание грунта речных берегов.

Активизация оползневых процессов в берегах развиваются за счет фильтрационных деформаций, связанных с увеличением порового давления в грунтах и гидродинамического воздействия потока подземных вод.

Выполненное моделирование устойчивости берегов при разном положении уровня воды в реке в зависимости от сезона показало, что за счет

быстрого падения уровня паводковых вод коэффициент устойчивости берегового склона может упасть более чем в два раза (с 1,528 на момент максимального уровня воды в реке до 0,718 на момент его падения).

Механизмы деформирования откосов дамбы за счет изменения гидрологических условий

Обобщенная инженерно-геологическая модель ЛТС дамбы может быть представлена в виде следующей схемы: в основании ЛТС залегает водоносный слой, представленный песками различной зернистости и текучими супесями, который перекрывается слабопроницаемыми суглинистыми и глинистыми грунтами.

Для оценки влияния изменения гидрогеологических условий в теле дамбы на устойчивость её откосов, было выполнено математическое моделирование методом предельного равновесия (Моргенштерна-Прайса).

Моделирование выполнялось по двум сценариям.

Первый сценарий. Оценка устойчивости внутреннего откоса дамбы при повышении уровня грунтовых вод в период экстремального паводка была проведена по трем схемам: оценка устойчивости внутреннего откоса дамбы без учёта влияния подземных вод; оценка устойчивости внутреннего откоса дамбы при повышении уровня грунтовых вод на начальный период экстремального паводка (УГВ 1); оценка устойчивости внутреннего откоса дамбы при повышении уровня грунтовых вод на конечный период экстремального паводка (УГВ 2).

Оказалось, что при повышении уровня грунтовых вод в теле дамбы в процессе паводка, K_y внутреннего откоса снижается от 1,14 до 0,89.

Второй сценарий. Оценка устойчивости внешнего откоса дамбы в ходе быстрого падения уровня паводковых вод. Для оценки влияния данного эффекта на устойчивость внешних откосов дамбы моделирование было выполнено по двум схемам: оценка устойчивости откоса дамбы при повышении уровня грунтовых вод на конечный период экстремального паводка (УГВ 2); оценка устойчивости откоса дамбы при понижении уровня грунтовых вод до УГВ 1.

Выяснилось, что при снижении уровня грунтовых вод в теле дамбы в процессе схода паводка K_y внешнего откоса, снижается от 1,6 до 1,12. Однако, следует заметить, данный эффект не полностью описывает процесс снижения K_y при быстрой сработке уровня. Вторым эффектом является то, что в слабодренлируемых грунтах тела дамбы возникает избыточное поровое давление, и удерживающие силы будут определяться недренлируемой прочностью грунтов на сдвиг.

Для совместного учета влияния обоих эффектов (снятие стабилизирующего действие воды на внешний откос и возникновения в теле дамбы избыточного порового давления) был использован трехэтапный метод оценки устойчивости при быстрой сработке уровня воды, предложенный Дунканом, Райтом и Вонгом.

Расчеты показывают, что при резком снижении уровня грунтовых вод в теле дамбы от УГВ 2 до УГВ 1, K_y внешнего откоса снижается от 1,6 до 1,05. Сравнение полученного результата с расчётом, позволяет оценить вклад

избыточного порового давления в снижение K_y откоса дамбы на 0,07. При полной сработке уровня воды коэффициент устойчивости становится меньше единицы ($K_y - 0,92$).

Оценка влияния фильтрационных процессов на устойчивость дамбы

Для оценки влияния геологического строения основания дамбы на ее устойчивость с учетом воздействия фильтрационного потока необходимо объединить теорию динамики подземных вод с соответствующими моделями расчета устойчивости склонов и откосов.

При моделировании ввиду сложности учета всех факторов, влияющих на движение фильтрационного потока, в расчетах были сделаны следующие допущения и приняты следующие условия: грунт тела дамбы принимается однородным и изотропным, т.е. когда значение коэффициента фильтрации во всех направлениях является постоянным; высота верхнего уровня воды в период паводка: +20,0 м; высота уровня воды за дамбой: +0,0 м; время паводка: 20 дней.

Так как одной из задач моделирования была оценка влияния геологического строения грунтового массива, являющегося основанием дамбы, на ее устойчивость, расчеты были выполнены по трем схемам, различающимся мощностью глинистого слоя в основании дамбы (табл. 3).

Таблица 3. Изменение K_y внутреннего откоса дамбы в период паводка

Схема	Мощность глинистых грунтов, м	Тип разреза	K_y до паводка	K_y после паводка
1	5	I-2	1,53	0,95 на 8-й день
2	10	III-2	1,41	0,99 на 16-й день
3	15	IV-2	1,39	1,01 на весь срок паводка

Из результатов выполненного моделирования видно, что устойчивость дамбы зависит как от мощности глинистого слоя в ее основании, так и от продолжительности паводка.

Оценка влияния увеличения гидравлического градиента в грунтах основания дамбы в период паводка

зависимости гидравлического градиента от продолжительности паводка для слоя глины разной мощности. Его анализ показывает, что при мощности глины 5 м величина гидравлического градиента превысит критическое значение через 3,5 дня. При мощности глины в основании дамбы 10 м, величина гидравлического градиента превысит критическое значение через 9 дней. При моделировании по третьей схеме (мощность слоя глины в основании дамбы 15 м) дамба при оценке фильтрационной прочности основания сохранит как устойчивость на весь период паводка.

Оценка условий возникновения неравномерной осадки дамбы

По данным инженерно-геологических исследований на отдельных участках в основании дамбы залегают слабые сильнодеформируемые ($E < 20$ МПа) грунты (например, подтип II-1, II-2 и т. д.), что постоянно

приводит к ее неравномерным осадкам в процессе реконструкции. Мощность слабых грунтов в основании дамбы изменяется от 5 м до 20 м.

Неравномерные осадки основания являются причиной растрескивания тела дамбы, например на 35 км зафиксирована трещина шириной 5 см. Как правило, эти трещины перпендикулярны оси дамбы и во время паводка могут стать причиной ее разрушения.

Для исследования неравномерной осадки основания дамбы, была использована программа RS2, основанная на методе конечных элементов (МКЭ).

Так как дамба возводилась поэтапно в разное время, расчет осадки основания также выполнен постадийно в соответствии с этапами строительства и реконструкции. В данном исследовании проведена оценка осадки дамбы для всех типов разрезов и получены следующие результаты (табл. 4).

Таблица 4. Общие результаты расчета осадки дамбы

Этап	Высота дамбы, (м)	Типы разреза							
		I-1	I-2	II-1	II-2	III-1	III-2	IV-1	IV-2
		Осадка дамбы, S (м)							
1	10	1,18	0,61	0,78	1,06	1,33	0,62	1,51	0,73
2	13	1,42	0,76	0,96	1,34	1,66	0,76	1,86	0,89
3	16	1,68	0,87	1,15	1,60	1,98	0,88	2,20	1,04
4	20	1,98	1,02	1,36	1,92	2,37	1,03	2,62	1,22
ΔS_{3-4}		0,30	0,15	0,21	0,32	0,39	0,15	0,42	0,18

Примечание: ΔS_{3-4} – осадка дамбы на последнем этапе ее строительства и эксплуатации

Из результатов расчета осадки основания видно, что на участках, где в разрезе присутствуют слабые грунты (типы I–1; II–1; II–2; III–1; IV–1) осадка имеет значительную величину, и наоборот, на участках (типы I–2; III–2; IV–2), где слабые грунты в разрезе отсутствуют, осадка основания незначительна.

Влияние неоднородности грунтов, слагающих тело дамбы на устойчивость ее откосов

Для исследования влияния пространственной изменчивости прочностных параметров грунта на вероятность разрушения откосов дамбы был использован случайный метод предельных равновесий (RLEM). В расчетах использовался критерий прочности Мора-Кулона, то была учтена пространственная изменчивость сцепления и угла внутреннего трения.

Выполненное исследование привели к следующим выводам:

- в условиях неопределенности ЛТС K_y не является надежным параметром, характеризующим устойчивость откосов дамбы. С увеличением неоднородности грунтов, слагающих тело дамбы, K_y не меняется, однако, вероятность разрушения возрастает.

- при оценке устойчивости откосов дамбы с учетом фактора неопределенности рекомендуется использовать либо вероятность развития процесса обрушения, либо показатель надежности (β), определяемый как:

$$\beta = \frac{K-1,0}{\sigma_K},$$

где: σ_K – среднее квадратическое отклонение коэффициента устойчивости склона (K_y).

– установлено влияние неоднородности на устойчивость откосов дамбы. С увеличением неоднородности вероятность их обрушения возрастает и, наоборот, с уменьшением неоднородности грунтов тела дамбы вероятность ее разрушения падает.

На основе выполненного анализа условий и механизмов развития деформаций в теле дамбы область ее расположения удалось разделить на 4 зоны, характеризующиеся преимущественным развитием определенных геологических процессов: уплотнение слабых грунтов и фильтрационные процессы. Подробная информация об опасных геологических зонах вдоль дамбы и их распространении показана в таблице 5 и на рисунке 4.

Таблица 5. Зоны дамбы р. Красной, выделенные по развитию характерных деформаций

Зона	Тип разреза	Оценка причин неустойчивости
1	I–1	Дамба неустойчива из-за фильтрационного потока в основании и очень большой неравномерной осадки дамбы
	II–1	
2	I–2	Дамба неустойчива из-за фильтрационного потока в основании
	III–2	
3	II–2	Дамба неустойчива из-за очень большой неравномерной осадки дамбы
	III–1	
	IV–1	
4	IV–2	Устойчивость дамбы высокая

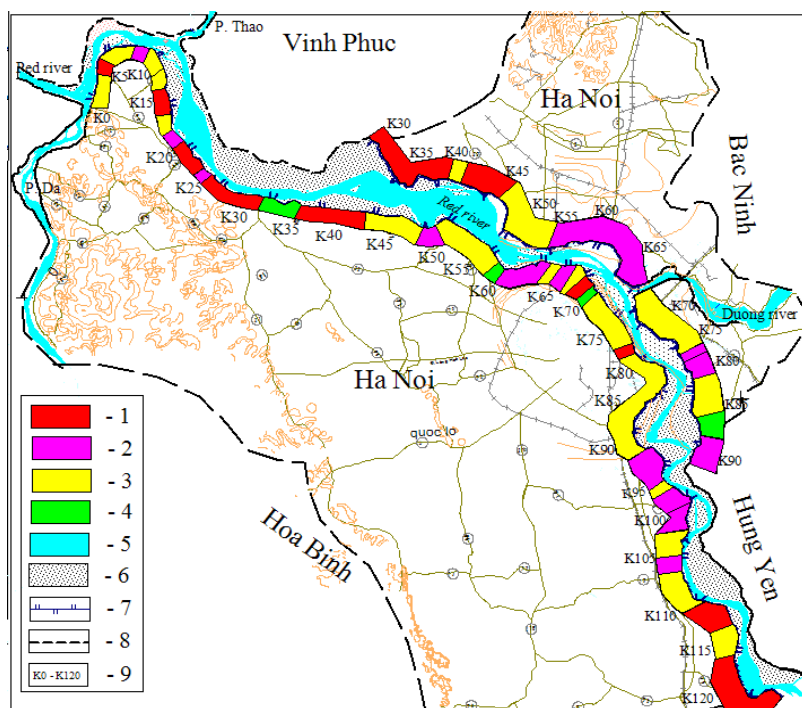


Рисунок 4. Карта распространения опасных по развитию деформаций участков основания дамбы р. Красной. Условные обозначения: 1 – Первая зона; 2 – Вторая зона; 3 – Третья зона; 4 – Четвертая зона; 5 – Красная река; 6 – Песчаная отмель около реки; 7 – Дамба; 8 – Границы между административными районами; 9 – Километры длины дамбы

4. ОБОСНОВАНИЕ РЕШЕНИЙ ПО СТАБИЛИЗАЦИИ ДАМБЫ

Выявление причин и механизмов разрушения дамбы и берегов реки (глава 3) доказало влияние повышения и быстрого понижения уровня воды в реке, а также длительного пребывания уровня воды на высоких отметках, на устойчивость берега реки и откосы дамбы. Неравномерные осадки, вызывающие развитие поперечных трещин в теле дамбы, связаны с изменением свойств грунтов вдоль оси дамбы на всем ее протяжении.

Следовательно, для обеспечения стабильной, безопасной работы дамбы в течение всего периода эксплуатации, который в данном случае пролонгируется на все время существования города Ханоя в качестве столицы государства, необходимо предложить меры по увеличению устойчивости и надежности дамбы.

Существуют различные решения для увеличения устойчивости гидротехнических сооружений и берегов реки, когда она зависит от геологического строения основания и других факторов.

В настоящее время применяются различные меры для предотвращения и ограничения вредного воздействия процессов эрозии, оползней и неравномерной осадки. Но не все они одинаковы по эффективности, каждая имеет определенные преимущества и недостатки. Поэтому нужно было исследовать и выбрать оптимальные способы, которые ограничат развитие опасных процессов в прибрежных районах р. Красной.

Меры по повышению устойчивости дамбы.

Расширение и выполаживание откосов дамбы

Одним из способов повышения устойчивости является увеличение ширины насыпи дамбы путем отсыпки одного из ее откосов или сразу обоих. Замечено, что при создании на внутреннем откосе бермы (для проложения дорог) в ходе расширения дамбы, происходит увеличение коэффициента устойчивости откоса. Материалами, используемыми для расширения насыпи является глинистый грунт с низким коэффициентом фильтрации ($K_f < 10^{-6}$ м/сут).

+ ***Преимущества:*** простота и высокая скорость строительства, низкая стоимость и возможность комплексного использования для обеспечения устойчивости дамбы во время ее эксплуатации.

+ ***Недостатки:*** потеря экономически важной части территории города вдоль расширенной части насыпи, невозможность отсыпки в густонаселенных районах, использование больших объемов строительных материалов.

а) Повышение устойчивости внутреннего откоса дамбы

Расчеты устойчивости, выполненные с учетом увеличения ширины внутреннего откоса, показывают, что в сухой период, мероприятия по стабилизации откоса дамбы повышают его K_y с 1,14 до 1,48. На начало паводка K_y дамбы без предлагаемых мер по стабилизации падает до 1,07 (откос дамбы переходит в состояние предельного равновесия), при их реализации откос дамбы остается устойчивым ($K_y=1,26$). На 20 день паводка K_y откоса дамбы без расширения становится меньше 1,0 (дамба разрушается), а с расширением K_y откоса дамбы снижается до 1,17, но она сохраняет устойчивость.

Исходя из результатов расчетов, пригрузка и расширение внутреннего откоса дамбы в сочетании с вертикальным дренажем его основания повышает устойчивость дамбы в период экстремального паводка.

б) Повышение устойчивости внешнего откоса дамбы

Аналогично, в конце экстремального паводка, когда уровень воды в реке быстро опускается, коэффициент устойчивости (K_y) внешнего откоса снижается от 1,6 до 0,92 (потеря устойчивости).

Расчеты показали, что после расширения внешнего откоса дамбы, в сухой период года коэффициент устойчивости (K_y) увеличился с 1,597 до 3,159. Когда уровень воды в реке быстро падает, коэффициент устойчивости внешнего откоса составляет 1,399 (без расширения $K_y=1,050$). После паводка коэффициент устойчивости внешнего откоса $K_y=1,209$ (без расширения $K_y=0,92$). Таким образом, внешний откос стабилизируется при применении этой меры.

Создание системы вертикального дренажа

Дренажные скважины, которые используются для снижения фильтрационного давления в основании дамб, являются довольно популярной и эффективной мерой обеспечения устойчивости дамбы при повышении уровня воды в реке. Через них подземные воды автоматически (самоизливом) разгружаются на поверхность земли, что уменьшает давление фильтрационного потока и позволяет установить за ним контроль, тем самым, свести к минимуму возникновение таких неблагоприятных процессов, как пlying, суффозия и разрушение основания дамбы.

Вертикальная линейная система дренажа должна быть расположена за дамбой примерно в 30–50 м от ее внутреннего откоса. Расстояние между скважинами зависит от геологического строения основания дамбы и водопроницаемости водоносного горизонта. Обычно оно составляет от 20 до 40 м. По степени вскрытия водоносного горизонта скважины должны являться совершенными.

Согласно расчетам, при повышении уровня реки в течение 20 дней, дамба остается устойчивой ($K_y = 1,568$ при мощности верхнего водоупора 5 м, $K_y = 1,380$ при мощности глин 10 м). Таким образом, эта защитная мера подходит для снижения фильтрационного давления и поддержания устойчивости дамбы.

Создание защитных облицовок на берегах реки

Эрозия и возникающие вследствие нее оползни на естественных берегах реки приводят к экономическим потерям в прибрежных районах. Для их устранения необходимо вводить меры предотвращения и уменьшения ущерба до минимального.

В настоящее время, многие защитные сооружения (такие как волнорезы, набережные, подпорные стенки и т. д.) применяются для предотвращения и ограничения неблагоприятного воздействия речного потока, вызывающего эрозию и оползание берегов. Но и эти меры имеют определенные преимущества и недостатки. Среди них нужно выбрать самые подходящие для района исследования, с учетом геологических, гидрогеологических условий, режима

течения, характера рельефа. Выбранная мера призвана предотвратить развитие процессов эрозии и оползнеобразование на берегах реки. Кроме того, при ее выборе также должны учитываться экономические затраты.

Автор предлагает меры по стабилизации берегов рек путем создания защитных облицовок и расширения склона с целью уменьшения крутизны берега реки для его устойчивости. Облицовка – это технологическое решение, в котором в качестве наружного покрытия используются устойчивые к механическому воздействию воды материалы. Коробчатые габионы сооружаются в нижней части склона, создавая фундамент для его облицовки. Кроме того, под коробчатыми габионами необходимо спроектировать обратный фильтр для отвода подземных вод с целью снижения фильтрационного давления на склоне реки. Облицовочные панели производят из сборных железобетонных плит. Эта мера имеет ряд преимуществ: простота конструкции, быстрое время монтажа, высокая устойчивость к воздействию водного потока.

Анализ показывает, что после расширения и укрепления склона берега реки коэффициент устойчивости (K_y) увеличился с 1,528 до 3,376. Когда уровень воды в реке быстро падает, коэффициент устойчивости склона составляет 1,532 (без укрепления $K_y = 0,718$). Таким образом, склон берега реки при применении этой меры будет устойчив.

Компенсационная подсыпка гребня дамбы

Одной из главных причин появления поперечных трещин на поверхности дамбы является неравномерная осадка на участках с разным геологическим строением. Результаты расчета осадки фрагментов дамбы, отличающихся по типу строения сферы взаимодействия, приведены в таблице 4.

Результаты расчета осадки дамбы показывают, что даже на конечном этапе (высота дамбы возросла с 16 до 20 м) расчетные значения достаточно велики и неравномерны по длине дамбы (максимальная $S=0,42$ м, а наименьшая $S=0,15$ м), что и вызывает формирование трещин. Поскольку дамба строилась поэтапно в течение 900 лет, грунты основания также консолидировались постепенно. Однако, неравномерная осадка дамбы до сих пор являлась основной причиной, вызывающей трещины на ее поверхности.

Для восстановления высоты дамбы на всем протяжении до проектной отметки +20 м, автором предлагается компенсационная подсыпка грунтовых материалов, которая соответствует величине осадки, вызванной консолидацией (табл. 4).

При компенсационной подсыпке грунтов равной 30 см для типа геологического разреза I–1, судя по расчету методом конечных элементов (RS 2), дополнительная осадка из-за подсыпки составляет 2,0 см. Следовательно, компенсационную подсыпку дамбы для участков с типом СВ I–1 предлагается увеличить до 32,0 см (табл. 6).

Результаты расчетов для всех выделенных типов геологических разрезов показывают, что при выведении гребня на проектную отметку, трещины из-за неравномерной осадки основания на поверхности дамбы не появятся.

Таблица 6. Подсыпка поверхности дамбы

Тип строения сферы взаимодействия	Высота компенсационной подсыпки – H_1 (м)	Осадка при подсыпке – S_1 (м)	Высота компенсационной подсыпки с учетом осадки – H_2 (м) ($H_2=H_1+S$)	Осадка с учетом подсыпки – S_2 (м)
I–1	0,30	0,020	0,320	0,020
I–2	0,15	0,006	0,156	0,006
II–1	0,21	0,010	0,220	0,010
II–2	0,32	0,024	0,324	0,024
III–1	0,39	0,037	0,427	0,037
III–2	0,15	0,005	0,155	0,005
IV–1	0,42	0,040	0,460	0,040
IV–2	0,18	0,007	0,187	0,007

Примечание: H_1 – осадка дамбы за конечный этап; S_1 – осадка дамбы при высоте компенсационной подсыпки H_1 ; H_2 – высота компенсационной подсыпки; S_2 – осадка дамбы при высоте компенсационной подсыпки H_2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам анализа собранной информации об инженерно-геологических условиях, существующих в дельтовой зоне р. Красной в черте Ханоя, и проведенных исследований причин и механизмов разрушения берега р. Красной и защитных дамб можно констатировать:

1. Территория, на которой 900 лет назад был основан г. Ханой, имеет ряд особенностей, который серьезно усложнял создание и эксплуатацию городской инфраструктуры на всем протяжении истории. К ним, в первую очередь, относится низменный, равнинный рельеф дельты р. Красной, в пределах которой в настоящее время раскинулась столичная агломерация. Вторым источником проблем является тропический климат, который характеризуется выпадением 65–70% годового количества осадков за три-четыре месяца, что приводит к продолжительным наводнениям (до 20 дней и более) с подъемом уровня воды до 18–19 м. Именно по этим причинам возведение защитных дамб началось практически сразу после основания города. К настоящему времени длина системы защитных сооружений составляет 120 км на правом берегу р. Красной и 60 км – на левом. Дамбы построены вручную из глинистых грунтов путем постепенного доведения гребня до отметки +20,0 м. Практически ежегодно на разных участках в период паводков происходят деформации дамбы, часто приводящие к прорыву воды в жилые кварталы и человеческим жертвам.

2. Возникшая линейная локальная ПТС «Дамба р. Красная» имеет очень сложную структуру сферы взаимодействия, сложенную дельтовыми четвертичными отложениями, характеризующимися фациальной изменчивостью, чрезвычайно пестрым литологическим и гранулометрическим составом грунтов с низкими прочностными и деформационными свойствами. Это предопределило фильтрационную неоднородность голоценового

водоносного горизонта, имеющего прерывистое распространение. На большей части приречной территории над водоносным горизонтом залегает глинистый грунт со слабой водопроницаемостью и различной мощностью.

3. Природные условия в сочетании с интенсивной хозяйственной деятельностью вдоль системы дамб создают благоприятные условия для развития парагенезиса экзогенных и инженерно-геологических процессов, серьезно угрожающих устойчивости системы дамб. К ним относятся: неравномерная осадка, трещинообразование на поверхности и откосах дамбы, оползание её откосов, фильтрация через тело и основание дамбы, суффозия и прорыв плывунов со стороны внутреннего откоса дамбы и другие.

4. Выявленные закономерности пространственной изменчивости условий залегания, состава и физико-механических свойств грунтов в сфере взаимодействия дамбы положены в основу типизации геологического строения основания дамбы на берегах р. Красной в пределах Ханоя.

5. Автору удалось выделить в сфере взаимодействия дамбы 8 типов геологических разрезов, объединенных в 4 класса, с прогнозной оценкой вероятных для каждого из них инженерно-геологических процессов, обуславливающих устойчивость дамбы и берегов реки.

6. Анализ компонентов инженерно-геологических условий вдоль сооружения и статистика проявлений опасных геологических процессов в основании дамбы р. Красной положены в основу моделирования:

- зависимости устойчивости речных берегов от геологического строения и гидрологического режима реки методами предельного равновесия;
- устойчивости откосов дамбы в зависимости от стадии паводка и его продолжительности (рост уровня, нахождение уровня на максимальных отметках и его быстрое падение), от однородности состава строительных материалов дамбы с помощью методов;
- фильтрационных процессов в основании методом конечных элементов;
- неравномерных осадок дамбы на различных по геологическому строению участках с помощью метода конечных элементов.

7. Моделирование позволило выявить причинно-следственные связи снижения коэффициента устойчивости и разрушения ПТС «Дамба р. Красной».

Устойчивость откосов дамб зависит не только от геологического строения их основания, но и от этапа паводка. При подъеме уровня воды в реке до пика паводка *внутренний* откос дамбы теряет устойчивость (K_y уменьшается до 0,89) и на нем возникают оползневые деформации. При быстром снижении уровня воды в реке, гидростатическое давление на *внешнем* откосе снижается, это становится причиной формирования здесь оползней (K_y снижается до 0,92).

Возникновение *неравномерных осадок*, вызывающих поперечные трещины на поверхности дамбы, обусловлено наличием слабых глинистых грунтов различной мощности, которые консолидируются в периоды, связанные с реконструкцией и наращиванием дамбы (максимальная результирующая осадка достигает 2,62 м для разреза типа III–1).

Устойчивость берегов реки зависит от геологического строения (наличия в их строении песчаных и слабых глинистых грунтов) и колебаний уровня воды

в реке в период паводка. Моделирование устойчивости берегов показало, что за счет быстрой сработки уровня паводковых вод коэффициент устойчивости берегового склона может упасть более чем в два раза (с $K_u = 1,5$ на пике паводка, до $K_u = 0,7$ при его максимальном падении).

В сухой сезон интенсивность и скорость эрозии берегов реки снижаются. Причины потери устойчивости изменяются. Разрушение берегов проявляется как результат фильтрации (разгрузки) подземных вод и связанной с этим процессом суффозии грунтов, слагающих берег. Кроме того, проведенное исследование показывает, что коэффициент устойчивости берега реки зависит от угла внутреннего трения песчаного грунта.

8. Превентивные меры для обеспечения устойчивой эксплуатации дамб и стабилизации берегов реки применяются в соответствии с геологическим строением для каждого конкретного участка дамбы и берега реки. Автор рекомендует подтвержденные расчетом следующие меры стабилизации дамбы и речных берегов:

- расширение и выполаживание насыпи на внешнем откосе дамбы для повышения его устойчивости при быстром падении уровня воды в реке после пика высокого паводка;
- расширение внутреннего откоса для предотвращения развития на нем оползневых деформаций в период длительных высоких паводков;
- вертикальный линейный дренаж, снижающий давление фильтрационного потока, для контроля и повышения устойчивости основания дамбы, а также для устойчивости ее внутреннего откоса в период паводков;
- компенсационную подсыпку дамбы для выравнивания ее поверхности, деформированной вследствие неравномерной осадки на разных участках дамбы.
- облицовку и выполаживание склона берега реки для повышения его устойчивости, когда уровень реки поднимается до пика паводка и быстро падает.

Результаты моделирования показали, что дамба и берег реки оставались бы устойчивыми во время эксплуатации после применения вышеуказанных мер. Таким образом, они являются лучшими решениями для обеспечения безопасной эксплуатации.

9. Опыт математического моделирования различных по своей природе негативных экзогенных и инженерно-геологических процессов, развивающихся в берегах р. Красной и на откосах защитных дамб, позволяет разработать оптимальную систему мероприятий по инженерной защите в соответствии с особенностями геологического строения конкретного участка.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях,

рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

1. Динь Т.Х., Фоменко И.К., Вязкова О.Е., Сироткина О.Н. Исследование влияния экстремальных паводков на устойчивость защитных дамб (на примере г. Ханоя) //Инженерные изыскания. 2018. Т. 12. № 11–12. С. 26–34.

2. Динь Т.Х., Вязкова О.Е., Фоменко И.К., Козловский С.В. К вопросу о причинах и механизмах разрушения берегов Красной реки в Ханое //Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2019. № 6. С. 88–93.

3. Динь Т.Х., Фоменко И.К., Вязкова О.Е., Сироткина О.Н. Изучение условий возможной потери устойчивости дамб в период паводка (на примере дамбы г. Ханой) //Инженерная геология. 2020. Т. 15. № 1. С. 6–19.

В других изданиях и материалах различных конференций:

4. Динь Т.Х., Вязкова О.Е., Фоменко И.К. Исследование причин и механизма процесса разрушения берегов Красной реки // Материалы XIV Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле». – МГРИ-РГГРУ. – 2019. – Том 3. – С. 93–95.

5. Динь Т.Х. Клеблеев Р.А. Причины разрушения дамб и предлагаемые решения для её устойчивости (на примере г. Ханой) // Материалы IX Международной научной конференции молодых ученых "Молодые – Наукам о Земле". 2020. С. 78–81.

6. Fomenko I., Dinh H., Sirotkina O., Barykina O. Geological structure of the dam base as a factor of its reliability during flood periods (Hanoi) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Krakow). 2020. Том 883, С. 012113-012113.