



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
Высшего образования
«Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе»
(МГРИ)

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

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
д-р. геол.-минерал. наук,
Вязкова О.Е

Научный консультант:
д-р. геол.-минерал. наук,
профессор
Фоменко И. К.

Москва – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ ЗАЩИТНЫХ ДАМБ	9
1.1. Опыт исследования и эксплуатации защитных дамб в мировой практике	9
1.2. Исследования устойчивости защитных дамб во Вьетнаме	14
1.3. Современные проблемы функционирования ПТС «Дамба р. Красной»	17
Выводы	23
2. ИНЖЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПОБЕРЕЖИЙ	
р. КРАСНОЙ И ИХ ТИПИЗАЦИЯ.....	24
2.1. Климатические условия	24
2.1.1. Атмосферные осадки.....	24
2.1.2. Испарение.....	25
2.1.3. Температура воздуха.....	25
2.2. Рельеф и речная сеть	27
2.3. Геологическое строение четвертичных отложений	31
2.4. Новейшая тектоническая активность и современная геодинамика	37
2.4.1. Тектонические разломы	37
2.4.2. Землетрясения.....	38
2.5. Физико-механические свойства грунтов в сфере взаимодействия дамбы	39
2.6. Гидрогеологические условия	51
2.7. Проявления экзогенных и инженерно-геологических процессов	54
2.8. Инженерно-геологическое строение дамбы р. Красной.....	60
2.9. Закономерности пространственной изменчивости состава и свойств грунтов в сфере взаимодействия дамбы	62
2.9.1. Основные теоретические положения	62
2.9.2. Типизация инженерно-геологических разрезов	63
Выводы	69
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ	
ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПТС «ДАМБА	
Р. КРАСНОЙ»	70

3.1. Выбор метода и программы для моделирования фильтрационного процесса.....	70
3.2. Выбор метода и программы для оценки устойчивости откоса дамбы и берегов р. Красная	72
3.3. Выбор метода и программы для расчета осадки	74
3.4. Условия и причины разрушения берегов р. Красной	75
3.4.1. Влияние геологического строения на устойчивость берега реки.....	76
3.4.2. Влияние гидрогеологического и гидрологического режима на устойчивость берега реки	78
3.5. Механизмы деформирования откосов дамбы за счет изменения гидрологических условий	80
3.6. Оценка влияния фильтрационных процессов в деформировании дамбы.....	88
3.7. Оценка влияния неравномерной осадки грунтов основания на деформацию дамбы	98
3.8. Влияние неоднородности грунтов, составляющих тело дамбы на устойчивость ее откосов.....	108
3.9. Зонирование дамбы по опасности развития деформаций	111
Выводы	114
4. ОБОСНОВАНИЕ РЕШЕНИЙ ПО СТАБИЛИЗАЦИИ ДАМБЫ.....	115
4.1. Меры по повышению устойчивости дамбы.....	115
4.1.1. Выполаживание откосов дамбы	115
4.1.2. Создание вертикальной дренажной системы	119
4.2. Создание защитных облицовок на берегах реки	124
4.3. Компенсационная подсыпка гребня дамбы	127
Выводы	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	135

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, составляющих 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 статистический 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 неустойчившегося режима функционирования ПТС как результат неравномерных осадок сооружения вследствие перманентной его реконструкции и продолжающейся консолидацией 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. и 2021 г.) и «Молодые – Научам 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

1.1. Опыт исследования и эксплуатации защитных дамб в мировой практике

Изучение устойчивости защитных дамб на речных побережьях имеет большое значение для защиты прибрежных районов. В решении этой проблемы заинтересованы многие страны мира, особенно развитые страны, такие как Нидерланды, Германия, США, Япония, Россия и т. д. Следует упомянуть проблемы, связанные со стабильностью системы дамб, включая неустойчивость из-за ряда причин, в том числе повышения уровня воды в реке и затем быстрого его понижения, эрозии, фильтрации через основание дамбы и высокой скорости потока. В последнее время проблема быстрого изменения уровня воды в реках особенно актуальна из-за изменения климата, что значительно угрожает стабильности системы дамб.

Глобальное изменение климата также является актуальной темой для развивающихся стран, поэтому осуществлено большое количество исследований в целях нахождения решения данной проблемы. Нидерланды обладают большой площадью, находящейся ниже уровня моря, в этой стране меры по предотвращению наводнений являются современными. Программу возведения дамб и сооружений для предотвращения наводнений начали после исторического наводнения в 1953 году (Delta program), в том числе модернизации дамб. Строительство системы защиты от наводнений остается важной проблемой в Нидерландах [84].

В 2005 году в рамках программы (VNK05), Нидерланды провели серьезную переоценку безопасности средств защиты от наводнений в условиях изменения климата. Ряд инвестиционных проектов осуществлен с целью модернизации системы дамб, совершенствования мер по предотвращению наводнений и т. д.

Нормы безопасности систем дамб добавлены и усовершенствованы в соответствии с принципом снижения рисков наводнений [74, 69, 102].

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 основное ядро углубленного исследования проблем безопасности дамб, результаты которых входят с высокой эффективностью применения в состав технических норм, используемых в проектировании и возведении дамб [76, 77, 97].

Кроме того, в Нидерландах, а также в других странах европейского сообщества, таких как Германия, Великобритания, Бельгия, Италия, России и т. д. многие фундаментальные и прикладные исследования проведены для решения конкретных проблем, которые касаются проектирования и возведения дамб [34, 68, 76, 77]. Глобальное изменение климата существенно влияет на безопасность дамб при эксплуатации, а также привлекает внимание и интерес ученых из разных исследовательских институтов, университетов по всему миру. В целом, все исследования сосредоточены на двух основных группах вопросов [62]:

- Группа 1: исследования проведены для составления методики решения данных проблем;
- Группа 2: исследования осуществлены для нахождения причин и механизмов процессов, вызываемых наводнениями.

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. Исходя из общей проблемы риска системы, предлагается оптимальный план проектирования в зависимости от уровня развития каждой страны и каждого региона [107, 109, 110, 111]. В США, подход был более осторожным, после наводнения в Новом Орлеане в 2005 году из-за воздействия урагана «Катрина». Проектировщики обращали внимание на отражение систем теорий и управление рисками при возведении сооружений по предотвращению наводнений в нормах проектирования [100, 106].

Вторая группа исследований сосредоточила внимание на наиболее распространенных процессах. Суффозия под основанием речной дамбы и устойчивость системы морских дамб являются наиболее актуальными вопросами, на которые обращали внимание ученые. Исследования процессов в основании дамб проведены во многих странах, таких как США и странах Западной Европы (Нидерланды, Германия), а также в Японии в первые годы XX века.

Блай (Bligh) предложил модель для расчета суффозии в основании дамбы на основе ряда фактических данных о разрушении дамб во многих странах мира [65]. При таком подходе, автор Лейн (Lane) усовершенствовал модель Блая, с учетом влияния вертикального фильтрационного потока в модели суффозии [88]. Обе эти эмпирические модели используются для прогнозирования разницы в высоте воды, влияющей на свойства каждого типа грунта. Хотя они содержат много эмпирических факторов, эти две модели широко применяли в западных странах, пока не появились иные модели прогнозирования.

Чугаев Р.Р. (1998) [7] на основе анализа опасных инцидентов с гидротехническими сооружениями, скорректировал теоретическую модель и определил допустимый градиент фильтрационного давления. По мнению этого автора, наиболее опасным фильтрационным потоком (недопустимым) в теле земляной дамбы или основании дабы является фильтрационный поток, возникающий в трещинах (дефектные участки в теле или основании

сооружения). Они образованы из-за особой причины. Основная задача при строительстве грунтовых сооружений состоит в том, чтобы не допустить возникновения трещин в их теле.

В 1988 году автор Селлмейер (Sellmeijer) развил модель суффозии на основе анализа предельных условий равновесия в эрозионной трубе под основанием дамбы в Нидерландах [101]. Помимо влияния диаметра частиц, для этой модели также рассмотрены различные параметры грунтового основания, такие как мощность фильтрационного горизонта, плотность, коэффициент фильтрации и т. д. Реальные наблюдения и теоретические прогнозы показаны в работах [86, 96].

В 2011 году Вера Ван (Vera Van) продолжает совершенствовать модель Селлмейера (Sellmeijer), с серией физических экспериментальных моделей в лаборатории и поле [108]. Ранее ряд исследований по суффозии также проведен в США, Германии и Японии, а их наличие указано в публикациях [87, 99, 116, 118]. В целом, результаты исследований играют важную роль в оценке суффозии на безопасность дамб.

Шмертман (Schmertmann, 2000) [99] провел аналогичный эксперимент в Нидерландах и обнаружил взаимосвязь влияния ряда факторов, таких как коэффициент неоднородности гранулометрического состава (C_u), мощность грунта, гранулометрический состав, плотность, гидравлический градиент на устойчивость основания дамбы.

Ранее в Японии и Германии, две группы независимых авторов также опубликовали результаты лабораторных исследований на основе фильтрационной модели и суффозии. Взаимосвязь между гранулометрическим составом, плотностью, коэффициентом неоднородности гранулометрического состава и т. д. с критическими градиентами была исследована для выработки рекомендаций по проектированию и оценке безопасности дамб [87, 95, 117].

Суффозия в связном грунте также представляет интерес для исследований в Австралии. Ван (Wan) и Фелл (Fell) [112] проводили исследование скорости суффозии с физической экспериментальной моделью в лаборатории, в целях прогноза влияния суффозии на безопасность дамбы. Результаты этого исследования являются чрезвычайно важными в оценке безопасности дамбы в Австралии в последующие годы.

В России ученые Ломтадзе В.Д. [21], Мироненко В.М., Секстаков А.Н., Патрусев Л.И., Козлова В.Х., Истомина В.С., Хоменко В.П. [52] и т. д. также прошли большой путь в исследованиях, связанных с суффозией, авторы опубликовали научные работы о фильтрационном процессе, который способствовал неустойчивости дамбы.

Козлов Л.И. (1934) [5, 15] провел эксперименты и доказал процесс суффозии, определив критическую скорость, под влиянием которой мелкие частицы песка проскакивают через поры грунта:

$$V_{кр} = 0.26 d_{60}^2 \left[1 + 1000 \left(\frac{d_{60}}{D_{60}} \right)^2 \right] \quad (\text{см/с})$$

Где d_{60} и D_{60} – контролируемые диаметры частиц двух слоев, мм.

На основе экспериментальных исследований В.С. Истоминой (1948) получена зависимость минимальных (безопасных) градиентов фильтрационного потока (при фильтрации, направленной снизу вверх) от степени гранулометрической неоднородности породы [3, 15].

Анализ кривой, аппроксимирующей вышеуказанную зависимость, показывает, что чем больше степень неоднородности гранулометрического состава грунта, тем меньше градиент фильтрационного потока, при этом возникает суффозия (рис. 1.1).

Кроме того, автор также указал некоторые значения допустимого градиента для некоторых типов грунтов с различными гетерогенными коэффициентами [15] (C_u):

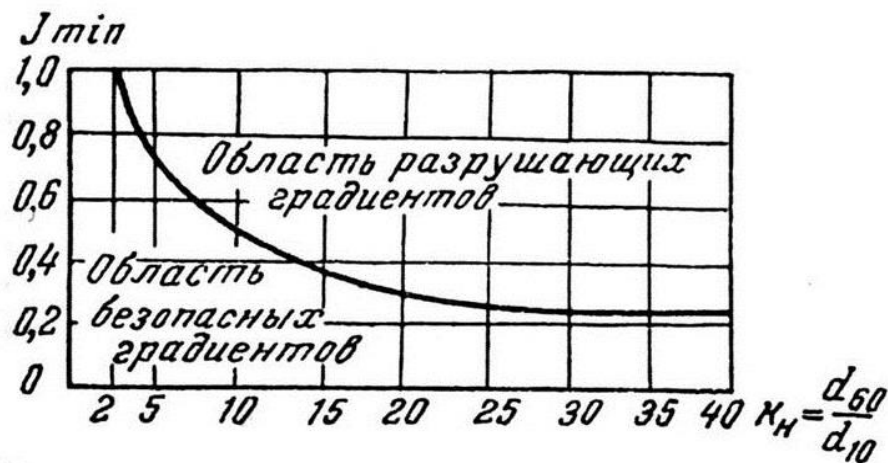


Рисунок 1.1. Зависимость развития суффозии от соотношения градиентов потока и неоднородности гранулометрического состава пород

$I_{gh} = 0.3 - 0.4$ при $C_u \leq 10$;

$I_{gh} = 0.2$ при $10 < C_u \leq 20$;

$I_{gh} = 0.1$ при $C_u > 20$;

где C_u – коэффициент неоднородности гранулометрического состава.

1.2. Исследования устойчивости защитных дамб во Вьетнаме

В соответствии с общей тенденцией развития в мире, во Вьетнаме исследование устойчивости дамб также привлекает особое внимание. В отчете по теме государственной программы, Нгуен Ч.Й. (1985) обсуждает современное тектоническое движение и возникновение современной тектонической структуры по руслу р. Красной [125]. Автор опубликовал геодинамические характеристики современной территории Северного Вьетнама [25]. Были четко обозначены тектонические и геодинамические характеристики дельты р. Красной. Согласно исследованию автора, р. Красная расположена в зоне тектонического разлома, поэтому тектонические движения будут влиять на устойчивость дамбы во время эксплуатации.

Устойчивость основания дамбы в Северной Дельте изучали Ле В.Т. [18] и Ван Д.Ч. в 1999 году [119], который показал, что она связана с геологическим строением, а именно, наличием «слабых» слоев. 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. Вопросы устойчивости «слабых» грунтов также рассмотрены в работе Фи Х.Т. и Строковой Л.А. [46]. Сами грунты традиционно рассматриваются как многофазные системы [114.]

В то же время некоторые авторы, такие как Фам Х.Т. [41], Нгуен Д.Д. [24] и Као Д.Д. [16] показали, что эрозия берегов реки влияет на устойчивость и морфологию берега реки. В этих исследованиях, авторы делают оценку процесса выветривания и воздействия потока на устойчивость берега реки. Кроме того, скорость эрозии берега р. Красной также оценивается во времени и в зависимости от скорости потока в реке.

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 [40]. 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 была изменена, в 1995 году автор Ву Т.Й. предложил математическое моделирование для изучения изменения русла Красной реки от Сонтай до Ханоя [11]. Автор создал прогнозную модель изменения русла р. Красной и ее морфологию в соответствии со скоростью эрозии берегов реки. В 2010 году Лыонг 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 [123]. 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 катастроф, произошедших в районах берегов рек. В 2004 году автор Чан Ч.Х. опубликовал общую оценку различных типов геологических рисков на территории Вьетнама и предложил решения для их профилактики [61]. 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 р. Красной на территории города Ханоя [54]. В этом исследовании автор указал, что скорость оседания дамбы зависит от деформационных характеристик некоторых типов грунтов четвертичного возраста (глина, суглинок, супесь и песок), на основе распространения которых и выполнялось зонирование и прогнозирование. Кроме того, в 2013 году [56, 57] автор провел еще несколько исследований фильтрационных процессов в основании дамбы в районах Фуктхо и Данфыонг в Ханое. В этом исследовании автор указывает, что оседание поверхности земли происходит из-за добычи подземных вод и это основная причина деформации дамбы. Проблемам оценки и прогноза деформаций земной поверхности вследствие откачки подземных вод посвящены работы Фи Х.Т., Строковой Л.А., Тхинь Ф.Х., Минь Н.Н. [38, 44, 45, 47–50].

В ходе изучения фильтрации в 2014 году Чан В.Т. и Ву К.М. [58, 59] предложили несколько моделей для определения давления подземных вод под дамбой в Ханое с помощью устройства измерения давления в скважине.

Результаты исследований показывают, что в сезон дождей давление подземных вод возрастает, потому что водоносные горизонты имеют гидравлическую связь с рекой. Наоборот, в сухой сезон наблюдается снижение давления грунтовых вод, которое способствует уплотнению грунта в основании дамбы. Это вызывает деформацию тела дамбы.

1.3. Современные проблемы функционирования ПТС «Дамба р. Красной»

История формирования ПТС «Дамба р. Красной» в Ханое

Согласно авторам Чан Ч. К. [60] и Чан В. Т. [136], процесс формирования и строительства системы Ханойской дамбы связан с историей строительства и развития города Ханой. История формирования системы дамбы Красной реки разделена на следующие этапы:

- в феодальных династиях дамбы вдоль крупных рек еще не сформировались, а существуют только в форме небольших насыпей, причем берег реки служит местной границей для узкого круга племен;

- в марте 1108 года первая дамба р. Красной 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 обеим берегам р. Красной от верховьев до моря построить дамбы для предотвращения наводнений. Большие речные дамбы, такие как на р. Красной и другие речные дамбы на реках Дуонг, Да и Дей и др., продолжают ежегодно строиться и модернизироваться для предотвращения наводнений.

Исследования Т.К. Веллера (Т.К. Weller) [104] и Б. Кирнана (В. Kiernan) [64] показывают, что во время династии Ле (1428–1527 гг.) были построены более крупные дамбы на основе старой системы дамб. В эти годы р. Красная стала

более агрессивной, разрушила дамбу и вызвала постоянные наводнения во время правления династии Нгуен. В течение этого времени много раз дамбы обрушались, вызывая наводнения, причиняя экономический ущерб и уничтожая большую площадь земель вдоль реки. Всем людям в стране приходилось много раз ремонтировать и восстанавливать дамбу р. Красной.

Согласно энциклопедии Вьетнамской истории [4] и Т.К. Веллеру (Т.К. Weller) [104] с 1803 по 1840 год, во время правления императора Зя Лонга приказано создать дамбу для предотвращения наводнений в сезоны дождей. С тех пор, в октябре ежегодно (после окончания сезона дождей), император Зя Лонг велел людям периодически проверять дамбу в местах, где часто возникали ее разрушения.

В 1873 году французские колонизаторы захватили Ханой. Под французским правлением разрушение дамбы вдоль р. Красной продолжалось. Однако в 1908–1945 годах французские инженеры также организовали крупную реконструкцию дамбы р. Красной в Ханое [4, 64,104].

Ниже (табл. 1.1) указаны высоты и годы реконструкций дамбы для противодействия повышению уровня воды в р. Красной с начала XX века по настоящее время:

Таблица 1.1.

Поэтапное увеличение высоты дамбы р. Красной

(По статистике Министерства сельского хозяйства Вьетнама [126])

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 подсистема «Дамба р. Красной» 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 р. Красной был заасфальтирован, а высота дамб была увеличена до среднего уровня +20,0 м [133, 136]. Ширина дамбы по подошве достигает 110 м. Внешние откосы дамбы (ориентированные в сторону реки) имеют заложение $m = 1 : 2$, а внутренние (направленные в сторону города) – $m = 1 : 3$. На некоторых участках внешние откосы дамб были отремонтированы путем применения противоволновых мер, а внутренние – засажены травой. Расположение дамб показано (рис. 1.2). Несмотря на длительное поэтапное доведение дамбы до современных отметок, в сезон дождей при наводнениях в различных местах вдоль дамбы происходят ее деформации различного характера [136].

Состояние подсистемы «Дамба р. Красной»

К настоящему времени вся поверхность дамбы была выровнена и предназначена для проложения дороги, покрытой асфальтом. Эксплуатационная нагрузка приводит к разрушению поверхности дамбы на локальных участках [126], которые наблюдаются на левом берегу Красной реки в участках: 42,5–45,0 км (район Мелинь); 39,5–40,5 км (район ДонгАнь); 75,8–77,4 км (район Лонгбьен). На правом берегу Красной реки в участках: 3,5–5,0 км и 35,0–42,0 км (район Сонтай); 56,7–58,0 км и 68,3–69,7 км (район Данфыонг); 10,0–12,8 км и 13,5–15,5 км (район Тулием); 43,4–45,0 км и 64,2–65,3 км (район Тайхо); 66,7–68,3 км и 71,0–74,8 км (район Тханьцуан); 111,1–114,2 км и 117,5–120,0 км (район Тханьчи).

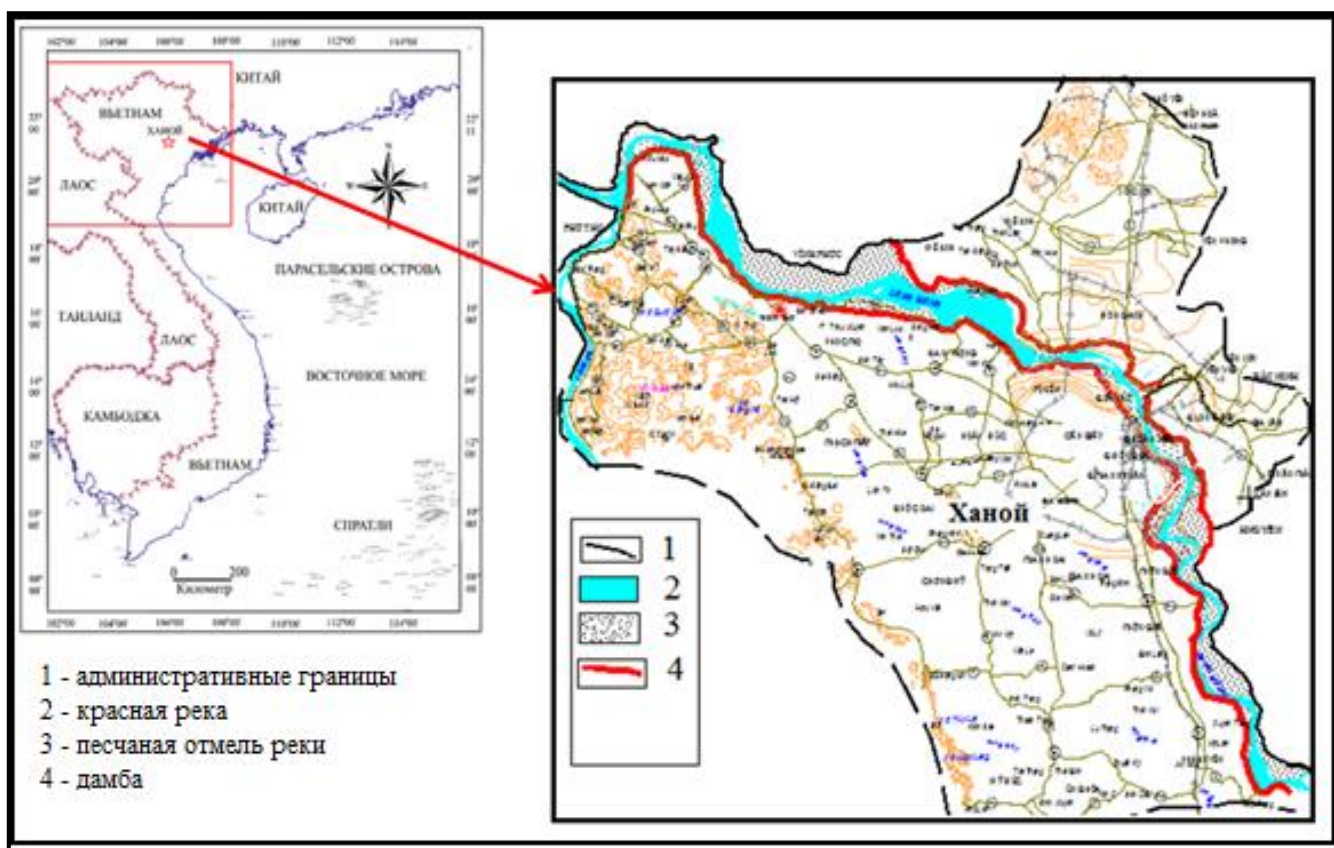


Рисунок 1.2. Схема расположения дамб на Красной реке

На откосах дамб, проходящих через жилые районы, установлены пешеходные дорожки. Участок дамбы на правом берегу р. Красной на интервале от 43 км до 85 км имеет дорожки с обеих сторон, шириной 5 м, которые были построены асинхронно и не имели дренажной системы. На левом берегу р. Красной дорожки были построены полностью на протяжении 60 км.

Современное состояние тела дамбы на левом и правом берегу р. Красной неоднородно из-за ее многоэтапного строительства, поэтому тело дамбы имеет много скрытых дефектов, возникших от деятельности термитов и мышей, а также фильтрации воды. В период высоких паводков вследствие неоднородности структуры материала дамбы часто происходят фильтрационные деформации, формируются трещины и поверхности скольжения на откосах дамбы и т. д.

На левом берегу деформируются следующие участки дамбы: 55,5–56,3 км (в коммуне Хайбой, район ДонгАнь); 69,6–70,6 км (в районе ЛонгБиен); 75,6–76,4 км (в районе Гиялам) [133].

На правом берегу участок с 7,7 до 25,0 км (район Бави) имеет на поверхности дамбы много трещин. Эти трещины уменьшают устойчивость дамбы и также могут способствовать разрушению дамбы при повышении уровня реки. Поэтому, эти места нуждаются в особом внимании и должны иметь систему мониторинга, чтобы предсказать и предотвратить развитие опасных процессов.

Кроме того, фильтрация часто происходит в теле и основании дамбы (на правом берегу р. Красной), когда горизонт паводковых вод достигает III уровня опасности или выше на интервалах: 6,0–6,2 км; 14,2–14,4 км и 20,0–20,5 км (район Бави); 49,4–51,3 км (район Тылием); 103,8 км; 104,7 км; 106,4 км; 111,2 км и 113,2–13,6 км (районе Фусюен) [133].

Состояние и процессы в подсистеме «Основание дамбы»

Дамба р. Красной на территории Ханоя расположена на основании, имеющем сложное и неоднородное геологическое строение. На нее непосредственно и регулярно влияют ежегодные паводки, хозяйственная деятельность, строительные работы в регионе, такие как: рытье канав, добыча песка в русле реки, транспортная нагрузка на поверхность дамбы. Так как вдоль системы дамб проявляется множество геодинамических процессов (а также гидродинамических), угрожающих, в значительной мере, устойчивости систем дамбы, в том числе неравномерная осадка, появление трещин в дамбе, фильтрация через тело и в основании дамбы, оползание откосов дамбы, плавунные явления и суффозия [14, 25, 54, 126] и т. д.

В целом, дамбы, проходящие через территорию Ханоя (вдоль р. Красной), были построены во время династии Ли-Чан и в настоящее время прошли реконструкцию, в ходе которой были увеличены ее высота и ширина подошвы, а

также проведено объединение фрагментов в целостную систему. Основание дамб еще находится в процессе уплотнения, консолидация еще не закончилась. Дамбы насыпают в основном вручную из глинистых пород. Тело и основание дамб обладают ограниченным запасом прочности, в результате которого часто возникают проблемы при ее эксплуатации. Согласно отчету 2012 года отдела по управлению дамбами и предотвращения наводнений в Ханое, на территории города существует ряд проблем с текущим состоянием дамбы [133].

В основании дамбы, которым служит часто слабый грунт, нередко происходят суффозия и плывуны из-за фильтрационных потоков.

Вышеуказанные явления могут быть объяснены следующим образом: дамбы насыпали в тех местах, где ранее существовали пруды, болота, грунты в которых отличаются по составу и свойствам от окружающих участков. Когда паводковые воды достигают III уровня опасности или выше на этих участках возникают фильтрационные потоки в неоднородных грунтах, что приводит к деформациям на следующих интервалах: 7,5–8,2 км; 10,0–11,5 км; 21–22,0 км; 31,5–36,2 км; 44,8 км; 81,2–83,3 км; 104,0–105,8 км; 109,7–110,5 км; 116,3–116,7 км [55]. Согласно результатам инженерно-геологических исследованиях [136] в районе Фуктхо на абсолютных отметках земной поверхности +3,50 м до –40,33 м геологическое строение под подошвой дамбы включает разные по составу грунты, в том числе супеси, мелкий песок или гальку [37]. Эти слои грунта способствуют просачиванию воды и деформации основания дамбы. При повышении уровня воды в реке до отметки +18,0 м или выше, фильтрационные потоки наблюдаются очевидцами вблизи от подножья откосов дамб [36, 136].

Некоторые участки дамбы на правой стороне р. Красной в основании имеют слабые грунты, а на иных участках дамбы, которые насыпали в местах разрушения существовавшей ранее дамбы, возникает ряд проблем в сезон дождей: разрушение основания из-за фильтрационных потоков, потеря устойчивости откоса дамбы. На участках от 55,0–56,6 км (в коммуне Хайбой,

район Донгань) – произошел размыв дамбы в 1913 году. На участке от 56,0–56,4 км восстановленное тело современной дамбы опирается на те места, где произошел прорыв прежней дамбы [135].

В настоящее время, существенное отрицательное влияние на дамбы оказывает бытовая и социально-экономическая деятельность, например: бурение скважин для питьевой воды; добыча глин для выпуска кирпичей и т. д. Все указанные факторы усиливают процесс фильтрационной деформации основания дамбы [55].

Выводы

1. ПТС «Дамба р. Красной» имеет многоэтапную историю строительства продолжительностью 900 лет. Сооружение постепенно росло в длину, высоту и ширину в течение всего этого времени. В настоящее время высота насыпи составляет 20 м при длине 120 км на правом берегу и 60 км – на левом.
2. Основание дамбы имеет сложное геологическое строение и находится в неустойчивом состоянии из-за отсутствия предварительного уплотнения и продолжающейся консолидации.
3. Тело и откосы дамбы подвергаются рискам оползневых деформаций и неравномерным осадкам.
4. Основными причинами процессов, развивающихся в основании дамбы, являются фильтрационные деформации, пlyingуны и суффозия.

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

При столь значительной длине защитных дамб, расположенных в дельте очень важно разобраться в характере и изменчивости компонентов инженерно-геологических условий, которые влияют на ее эксплуатацию.

2.1. Климатические условия

Ханой расположен в Северной дельте, где характерной чертой тропического муссонного климата является наличие двух сезонов с очень разным количеством атмосферных осадков. В сезон дождей в месяц выпадает до 200–300 мм, а в засушливый сезон для месяца нормой осадков является 12–70 мм, что меньше в 4–15 раз [128].

Лето жаркое, влажное, с большим количеством дождей, а зима холодная с маленьким количеством атмосферных осадков. Горные области ХоаБинь и БаВи на западе и горная область ТамДао на северо-востоке оказывают большое влияние на режим выпадения осадков в оба сезона.

2.1.1. Атмосферные осадки

Центр города Ханоя и пригородных районов имеют такой же режим выпадения осадков, как и остальные районы Северной дельты. Количество осадков в год показано в таблице 2.1 [128] и колеблется от 1169,8 мм (2010 г.) до 2254,70 мм (2012 г.), составляя в среднем 1576,23 мм.

В сухой сезон среднее количество осадков в месяц изменяется от 12,30 мм (январь) до 67,51 мм (ноябрь). Из экстремальных значений количества осадков в месяц наблюдались: максимум – 254,7 мм (ноябрь 2002 г.) и минимум – 2,2 мм (январь 2010 г.).

В сезон дождей среднее количество осадков в месяц колеблется от 182,30 мм (май) до 292,64 мм (июнь). Абсолютный минимум наблюдался в

апреле 2006 г. (30,4 мм), а максимум – в июне того же года 614,4 мм. Бывают даже дни, когда количество осадков достигло 169,8 мм (3 августа 2012 г.).

Таблица 2.1

Количество осадков в районе Ханоя с января 2002 г. по декабрь 2016 г. (мм)

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
Год													
2002	5,9	88,0	154,0	82,8	100,0	189,0	308,0	275,6	92,8	119,2	254,7	22,0	1692,0
2004	2,9	68,0	78,8	52,8	220,0	179,0	278,0	375,6	91,8	102,8	117,9	32,0	1599,6
2006	4,3	7,7	32,9	30,4	156,5	614,4	116,9	124,0	129,3	106,6	2,4	12,7	1338,1
2008	25,0	7,3	13,9	67,2	168,8	283,3	336,6	166,2	105,4	201,4	89,4	83,1	1547,6
2010	2,2	32,7	34,6	151,6	104,6	187,1	260,1	139,9	48,0	206,8	2,2	0,5	1169,8
2012	15,7	41,9	139,7	73,4	223,5	374,7	487,4	576,7	74,9	183,4	21,9	41,5	2254,7
2014	8,6	17,8	11,3	59,4	214,2	239,6	261,7	201,7	178,6	127,5	51,2	60,2	1431,8
2016	40,0	36,8	12,9	59,5	270,8	274,0	250,9	375,0	243,1	130,4	40,0	5,7	1582,0
Средний	12,3	36,60	58,07	82,06	182,3	292,6	287,4	279,3	120,5	132,6	67,51	32,15	1576,9

Примечание: По наблюдениям гидрометеорологического мониторинга Ханоя [128]

2.1.2. Испарение

Как и количество осадков, испарение имеет важное значение для климата в Северной области дельты. Количество испарения показано в таблице 2.2.

Среднегодовое испарение колеблется от 825,5 мм (2014 г.) до 1120 мм (2016 г.), в среднем 955,2 мм. Среднемесячное испарение с 2002 по декабрь 2016 года варьируется от 53,5 мм (февраль) до 94,9 мм (октябрь).

Общее среднегодовое испарение составляет 60,1% среднегодового количества осадков [128].

2.1.3. Температура воздуха

Температура воздуха в Ханое достаточно мало меняется в течение года, за исключением района пиков БаВи и района МиДык. Средняя температура на станции наблюдения Ланг и СонТай в Ханое показана в таблице 2.3. Среднегодовая температура воздуха колеблется от 23,57°C (2002 г.) до 25,11°C (2006 г.), в среднем 24,34°C. Среднемесячная температура воздуха изменяется от 17,8°C до 29,7°C.

Таблица 2.2.

Величина испарения в районе Ханоя с января 2002 по декабрь 2016 г. (мм)

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
Год													
2002	67,8	40,6	51,3	58,9	89,5	87,9	82,1	76,3	61,5	95,6	78,2	63,1	852,8
2004	58,7	42,6	49,4	47,8	87,6	98,2	87,5	78,6	96,8	113,8	82,9	86,5	930,4
2006	67,8	61,2	46,0	81,2	100,0	94,9	112,4	95,6	94,9	114,4	100,2	99,6	1069,2
2008	73,2	73,3	72,5	77,7	83,2	84,6	100,7	80,7	96,9	80,3	63,4	82,9	969,4
2010	71,6	50,4	46,1	64,4	93,5	93,6	101,3	83,7	99,0	80,6	108,0	96,1	988,3
2012	68,2	53,2	55,8	52,2	89,9	84,0	78,3	74,4	93,0	80,6	93,0	63,0	885,6
2014	68,2	44,8	63,0	78,0	86,8	84,1	78,0	69,0	69,0	72,0	63,0	49,6	825,5
2016	57,0	61,6	84,0	90,0	111,6	126,0	106,8	81,2	87,2	121,5	99,4	88,6	1120,0
Средний	66,6	53,5	58,5	68,8	92,8	94,2	93,4	79,9	87,3	94,9	86,0	78,7	955,2

Примечание: По наблюдениям гидрометеорологического мониторинга Ханоя [128]

Таблица 2.3

Температура воздуха в районе Ханоя с января 2002 по декабрь 2016 г. (° C)

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
Год													
2002	16,2	16,4	20,1	21	27,4	29,2	29,6	28,4	27,8	25,8	22,9	18,0	23,57
2004	18,4	17,0	20,7	24,5	28,1	29,8	28,8	29,1	26,0	26,4	23,8	19,2	24,32
2006	17,8	19,2	20,7	26,5	28,6	30,3	30,7	29,7	28,3	26,2	23,0	20,3	25,11
2008	17,9	19,8	21,7	25,4	26,4	29,4	30,1	28,7	28,4	25,4	22,0	16,3	24,29
2010	18,4	16,2	20,3	25,2	27,5	28,6	29,7	29,2	27,7	25,4	21,8	20,6	24,22
2012	18,6	17,5	21,3	24,3	27,2	29,0	29,3	28,7	28,5	26,1	21,2	17,8	24,13
2014	17,7	19,5	22,5	25,9	27,7	29,6	29,4	28,4	27,6	25,2	21,2	18,9	24,47
2016	17,7	18,3	21,1	24,8	27,7	29,5	29,7	28,9	27,8	25,9	22,5	18,7	24,29
Средний	17,8	18,0	21,1	24,7	27,6	29,4	29,7	28,9	27,8	25,8	22,3	18,7	24,34

Примечание: По наблюдениям гидрометеорологического мониторинга Ханоя [128]

Район отличается высокой температурой, влажностью и большим количеством атмосферных осадков, характер распределения которых приведен на рис. 2.1.

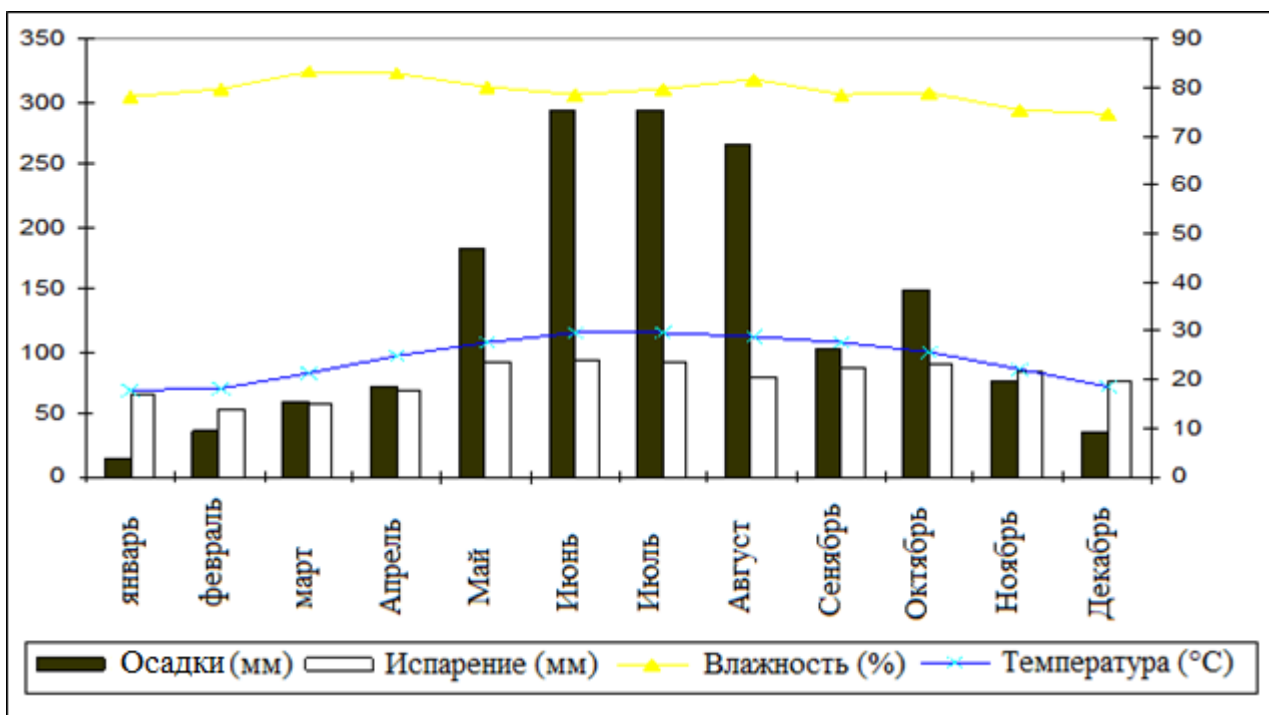


Рисунок 2.1. График изменение климатических факторов в районе Ханоя [128]

2.2. Рельеф и речная сеть

Район исследования имеет в основном равнинный низменный рельеф, дельты р. Красной, поверхность рельефа довольно ровная и имеет тенденцию понижения к югу. Рельеф имеет абсолютные отметки 5–10 м [105, 136].

В рельефе дельты встречается много понижений, заполненных прудами, озерами и болотами. Они сформированы либо в местах тектонических опусканий, либо на участках некомпенсированного осадконакопления в зонах размыва при смене положения меандрирующих русел, которые развиты в таких областях, как Данфьюнг, Сонтай и т. д. Город потратил много денег, чтобы заполнить озера, пруды вблизи от дамбы. Однако отсыпанные грунты обладают большой водопроницаемостью и малой плотностью.

Между дамбой и руслом реки местами встречаются современные отмели, сложенные глинистыми пластичными грунтами или песками разной крупности [14].

Река Красная – самая большая река в Ханое. Она начинается в Китае и продолжается во Вьетнаме, протекая через несколько северных провинций страны, а затем впадает в Тонкинский залив Южно-Китайского моря. Речная сеть в Северной дельте показана на рисунке 2.2.

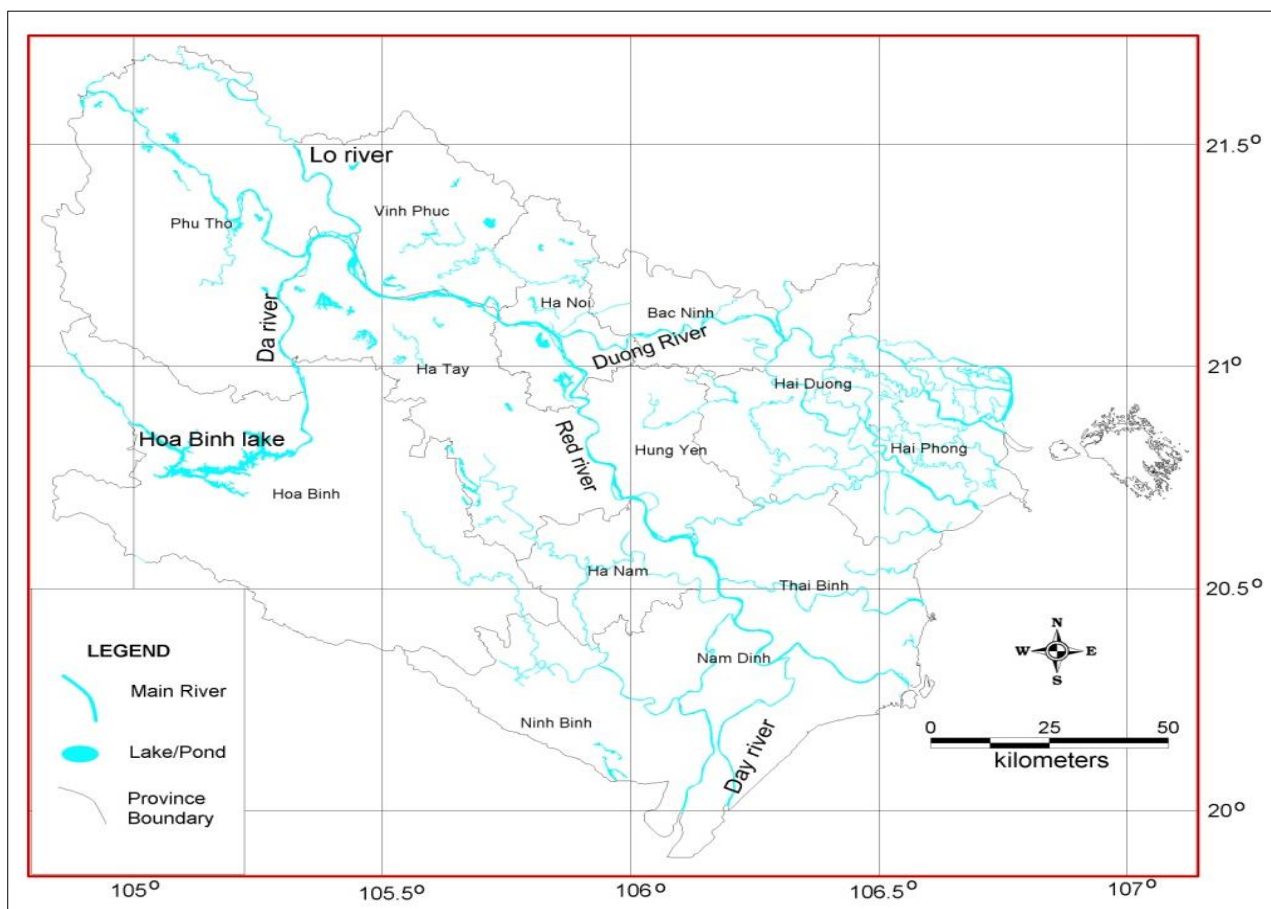


Рисунок 2.2. Схема речной сети в районе Ханоя [72]

Река Красная втекает в Ханой в районе БаВи. Длина реки, протекающей через Ханой, составляет 120 км. В черте города она принимает притоки Да, Ло (в районе БаВи) и Дуонг (в районе ГияЛам), поэтому каждый год в сезон дождей уровень воды в Красной реке поднимается очень высоко, когда из-за паводка происходят разрывы дамбы. Ниже приведены сведения, характеризующие гидрологический режим реки [128, 130, 131].

Уровень воды. Среднемесячный уровень воды в течение года колеблется от 2,48 м (декабрь) до 15,90 м (август). Самый высокий уровень воды обычно наблюдается в июле и августе каждого года, при этом уровень воды достигает 19,43 м (21 августа 2012 г.). И, наоборот, в феврале и марте каждый год уровень воды низкий и может составлять 2,00 м (20 декабря 2006 г.). Результаты наблюдения за уровнем воды показаны в таблице 2.5 и на рисунке 2.3.

Таблица 2.5

Среднемесячный уровень воды на станции наблюдения Ханоя (см)

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Средние годы
Год													
2002	278	268	302	476	586	814	1077	1290	790	538	530	348	600
2004	325	320	360	590	527	710	1076	1344	794	663	402	349	597
2006	310	300	295	461	556	778	1170	1584	702	549	303	248	563
2008	250	232	255	400	591	792	1031	1464	845	504	559	348	573
2010	301	286	302	420	590	760	1063	1532	783	521	352	298	559
2012	268	266	306	408	552	960	1114	1943	729	555	507	332	593
2014	295	286	293	402	591	879	1019	1782	788	597	343	315	574
2016	345	285	300	408	578	761	1010	1852	838	598	294	258	561
Средний	296,5	280,4	301,6	445,6	571,4	806,8	1070	1598,9	783,6	565,6	411,3	312,0	577,4

Примечание: По наблюдениям гидрометеорологического мониторинга Ханоя [131]

Расход. Среднемесячный расход в период с 2002 по 2016 годы варьируется в среднем от 730 м³/с (февраль) до 8910 м³/с (июль). Максимальный расход потока зафиксирован 20 августа 2002 г. – 14800 м³/с, а минимальный – 540 м³/с (20 февраля 2008 г.). Величины расхода приведены в таблице 2.6.

Твердый сток, приносимый из верховьев течением воды, ежегодно колеблется от 57,3.10⁶ т/год (в сухой сезон) до 113,6.10⁶ т/год (в сезон дождей). В результате на реке образуются песчаные отмели [72, 128, 131].

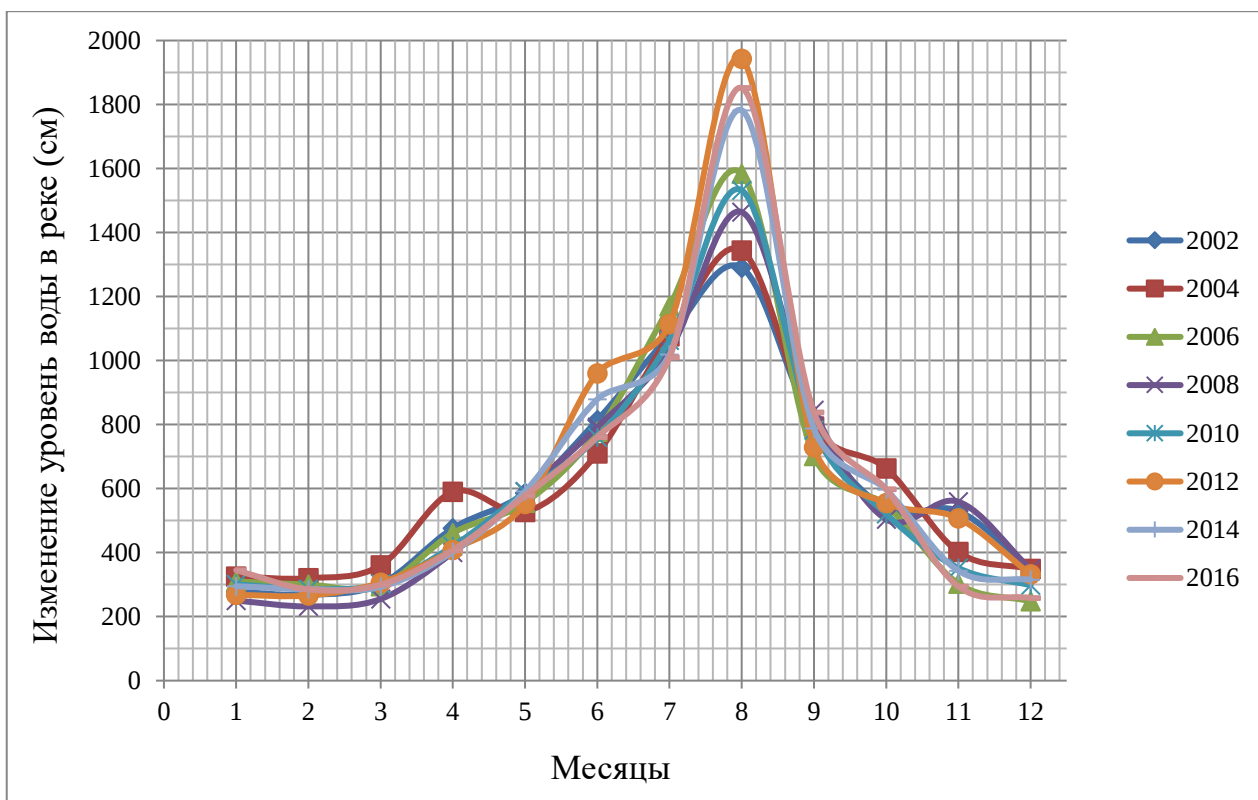


Рисунок 2.3. Закономерность изменения уровня воды в Красной реке в течение года [131]

Таблица 2.6

Среднемесячный расход воды в станции наблюдения Ханоя ($\text{м}^3/\text{с}$)

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Средние
Год													годы
2002	1040	999	1220	1570	2380	3560	6890	8830	3780	2630	2740	1270	3090
2004	1150	1120	1390	2380	1880	1770	7450	6120	4260	4130	1690	1230	2900
2006	984	978	948	1340	1310	3590	8910	5280	2690	1500	1190	828	2480
2008	837	730	871	1160	1860	3700	6590	5520	5390	2810	3300	1490	2870
2010	1180	1090	1190	1300	1700	3220	5790	4900	2360	2690	1380	1050	2330
2012	928	926	1080	1060	1910	5020	7320	5760	2580	2160	2580	1150	2720
2014	955	1020	1060	1070	2510	4220	5880	8840	2330	1620	1340	1130	2680
2016	1390	1010	1180	1130	1640	2440	5040	4350	4240	1860	1140	939	2210
Средний	1058	984	1117	1376	1899	3440	6734	6200	3454	2425	1920	1136	2660

Примечание: По наблюдениям гидрологического мониторинга Ханоя [131]

2.3. Геологическое строение четвертичных отложений

Четвертичные отложения приречной области Красной реки в Ханое в основном имеют аллювиальный, морской, озерно-болотный генезис с очень сложным строением. Они были сформированы в период от раннего плейстоцена до позднего голоцена. В результате комплексного анализа литологического состава и палеонтологических остатков удалось разделить четвертичные отложения в районе исследований на 5 стратиграфических единиц. Ниже они будут описаны снизу вверх [14, 56, 127, 136].

Нижнеплейстоценовая аллювиальная свита Лечи

Свиту Лечи описал Нго Куанг Тоан в 1989 г [127]. Отложения свиты ЛеЧи полностью перекрываются более молодыми отложениями, распределенными вдоль Красной реки. На юге и юго-востоке города Ханоя площадь распространения и мощность свиты увеличивается. Она вскрыта на глубине от 45,0 до 70,0 м от поверхности и ее мощность колеблется от 2,5 до 24,5 м. Она разделена на 3 пачки:

- Пачка 1 (нижняя) состоит из кварцевой гальки, кремния, мрамора и т. д., гравия, смешанного с небольшим количеством песка, глины, галька диаметром 3–5 см, принадлежащая фации горной реки и переходной зоне, мощность 20 м, залегает на глубине 67,0 до 77,0 м.

- Пачка 2 (средняя) состоит из кварцевых средних, мелких, пылеватых песков на 90–97%, принадлежит русловой фации, мощностью 3–10 м.

- Пачка 3 (верхняя) состоит из глины, песка, местами не полностью разложившегося торфа, характерных для селевых отложений, мощностью 1–4,5 м.

Среднеплейстоценовая аллювиальная и аллювиально-пролювиальная свита Ханой

Свита Ханой описана и изучена Хоанг Нгок Ки в 1973 году [127]. Она распространена довольно широко в районе дельты Красной реки. Глубина распространения около 30–45 м. Свита Ханой имеет два происхождения:

+ *Аллювиально-пролювиальные отложения.* Этот тип отложений распространен в некоторых местах, таких как СонТай, ЧуонгМай, ШокСон и т. д. с мощностью около 3,0–6,0 м. Эта свита отложения делится на две пачки:

- Пачка 1 (нижняя) состоит из гальки, гравия, песка и желтой глины со средней мощностью 1–3 м.

- Пачка 2 (верхняя) состоит из глины и мелкого песка со средней мощностью 2,2–3,5 м. В этом типе отложений много пыльцы *Quercus*, *Ulmus*, *Polydiacaea*.

+ *Аллювиальные отложения.* Этот тип отложений распространен по всей северной части дельты. Средняя мощность варьируется от 10 до 34 м и делится на три пачки:

- Пачка 1 (нижняя) состоит из гальки, валунов, гравия и песка разных цветов с мощностью 10,0–20,0 м.

- Пачка 2 (средняя) состоит из мелкой гальки, крупнозернистого и мелкого песка, со средней мощностью 17,0 м.

- Пачка 3 (верхняя) состоит из глины, суглинка, смешанного с мелкими песчинками, некоторые остатки растений не полностью разложились; мощность пачки около 4,5 м.

Верхнеплейстоценовая аллювиально-морская свита Виньфук

Свита Виньфук изучена Хоанг Нгок Ки в 1973 году [127]. При составлении геологической карты Ханоя масштаба 1:200 000. Свита Виньфук широко распространена, обнажается на больших площадях в районах Шоксон и Донгань, в коммунах Конхуе и Цуандинь и узкими полосами в Ханое, в остальной части

территории залегает на разных глубинах, имеет аллювиально-морской генезис, делится на четыре пачки:

- Пачка 1 (нижняя) состоит из гальки, мелкой гальки, песка с небольшим количеством глины; пачка принадлежит фации горной реки и переходной зоне. Средняя мощность варьируется от 3 до 10 м.

- Пачка 2 состоит из песка с небольшим количеством глины, иногда с линзами мелкого гравия; пачка типична для фации дельты реки. Средняя мощность колеблется 33 м.

- Пачка 3 состоит из каолинитовой белой и серой глины, желто-серой иловатой глины, чередования иловатого песка, глинистого ила, глины и мелкого песка, типичных для речной отмели. Верхняя часть этой пачки имеет желтую, красновато-коричневую окраску и мелкие включения оксида железа. Мощность варьируется от 10 до 15 м.

- Пачка 4 (верхняя) состоит из черной, черно-коричневой, желто-серой глины, содержащей растительные остатки, характерные для фации озера и болота, которые расположены около реки. В исследуемом районе эта пачка встречается редко и мощностью варьируется от 3 до 8 м.

Поверхность свиты Виньфук имеет тенденцию к глубокому погружению к югу и юго-востоку исследуемой области и имеет общую мощность от 10 до 45 м. Последующими эрозионными процессами кровля отложений этой свиты сильно разрушена, поэтому вдоль Красной реки и других небольших рек поверхность свиты вскрывается на глубине от 25 до 30 м и более.

Нижнеголоценовая озерно-болотная свита Хайхынг

Свита Хайхынг изучена Хоанг Нгок Ки в 1978 году [127, 136]. Свита Хайхынг распространена в центре и юго-востоке города Ханой. Эта свита разделена на 3 подсвиты:

Нижняя подсвита

Озерно-болотные отложения, образовавшихся в период перед трансгрессией моря, довольно широко распространены, заполняют глубокие бассейны и старые рукава русел реки, возникшие в результате эрозии на поверхности свиты Виньфук. По составу можно разделить разрез подсвиты на два слоя: верхний слой – торф с изменением мощности от 0,4 м до 2,0 м, обычно менее 1 м; нижний слой – слой ила содержит органический шлам с изменением мощности от 1,0 м до 3,0 м.

Торф состоит из ветвей и стеблей, имеющих разную степень разложения, часто расположенных в черно-коричневых, серо-черных слоях, с очень высокой влажностью и пористостью, отмеченной анизотропией, в нескольких местах слой торфа отсутствует.

Органический ил имеет неоднородный состав, по глубине содержание органических веществ имеет тенденцию к снижению, количество пыли и частиц песка увеличивается.

Глубина залегания подсвиты, довольно стабильна, постепенно увеличиваясь в направлении северо-запада к юго-востоку от 4–6 м до 5–7 м, местами до 8–10 м. Из-за заполнения отложениями старых русел мощность подсвиты изменяется очень сильно, даже в пределах строительной площадки, мощность слоя может возрасть от 2,0 до 12,0 м, вместо обычного колебания в пределах 2–6 м или 8–12 м, в некоторых местах достигая 20 м.

Отложение нижней подсвиты Хайхынг покрывают эродированные поверхности слоя пятнистой глины или слоя песка свиты Виньфук. Состав, свойства и сильные изменения мощности нижней подсвиты Хайхынг вызывают большие трудности при проведении строительных работ.

Средняя подсвита

Эта подсвита распространена в центре, на юге и юго-востоке области исследования, часто связана с торфом и органическими илами нижней подсвиты,

имеет прерывистое распространение из-за речной эрозии и строительной хозяйственной деятельности. Глубина распространения от 3–6 м.

Наиболее характерны морские отложения – очень однородная глина характерного сине-серого цвета с желто-серым пятнами в верхней части мощностью 0,5–4 м, обычно 2 м.

Континентальные отложения озер очень ограничены, сложены сине-серой, желто-серой глиной, в нижней части с мелким песком, скоплениями оксида железа мощностью около 1 м. Из-за малой мощности, прерывистого распространения роль водоупора отложения средней подсвиты Хайхынг играют ограниченно.

Верхняя подсвита

Состоит из отложений болотного происхождения, сформировавшихся после трансгрессии моря, которые развивались только в ложинах между холмами, включают торф и глину с органическим илом, а также гумус растений. В области исследования эти отложения отсутствуют.

Таким образом, свита Хайхынг состоит из мягких отложений, которые сильно изменяются по мощности.

Верхнеголоценовая свита Тхайбинь

Свита Тхайбинь выделена Хоанг Нгок Ки в 1978 году [127, 136]. Она распространена на юге и юго-востоке вдоль двух берегов р. Красной. Это самая молодая свита на территории Ханоя. В этот период уровень морской воды понизился, эрозия и осадконакопление р. Красной и других рек увеличились в процессе образования дельты Бакбо. Эта свита разделена на следующие две подсвиты.

Нижняя подсвита

Отложения, в основном, речного происхождения и широко распространены. По составу их можно разделить на две пачки:

+ Нижняя пачка состоит в основном из мелкого и пылеватого песка, в нижней части встречаются среднезернистый песок и мелкий гравий, песок часто переслаивается с линзами и тонкими слоями супеси и суглинка. Глубина залегания кровли слоя колеблется от 4,0 до 8,0 м, местами достигая 12,0 м. Мощность пачки обычно изменяется от 16,0 до 18,0 м, на участках близких к реке может достигать 20 м. Эта пачка залегает на свите Виньфук, иногда на песчаных отложениях свиты Тхайбинь и Виньфук.

+ Верхняя пачка распространена очень широко, в основном состоит из суглинка, супеси, глины, розовато-коричневого, серо-коричневого цвета, с чередованием множества линз и тонких прослоев мелкого, пылеватого песка и супеси. Мощность пачки варьируется от 2,0–3,0 м до 6,0–7,0 м, в некоторых местах достигая 13,0–15,0 м и более. Эта пачка залегает на нижней пачке свиты Тхайбинь и отложениях свиты Хайхынг и в нескольких местах сформировала тонкий слой на глинистых отложениях свиты Виньфук.

Кроме речных отложений, в нижней подсвите встречаются также отложения смешанного аллювиально-озерно-болотного генезиса. Эти осадки накапливались в лагуне вдоль реки, которая затем заболотилась. Распространены они на узкой территории, включают в свой состав глину и растительные гумусовые остатки и фауну моллюсковые, мощностью варьируется от 1,0 м до 2,0 м. Наибольшая мощность нижней свиты может достигать более 30 м.

Верхняя подсвита

Эти отложения распространены перед дамбой р. Красной, состоят из руслового речного песка с прослоями глины, суглинка, супеси. Песок чередуется с глиной и суглинком в низкой, средней и высокой отмелях. Мощность подсвиты составляет около 15 м.

В целом четвертичные отложения в Ханое делятся на 5 ритмов, соответствующих различным периодам формирования, каждый ритм начинается с крупнозернистых отложений, заканчиваясь мелкозернистыми осадками.

2.4. Новейшая тектоническая активность и современная геодинамика

Район исследования является частью бассейна р. Красной, где довольно отчетливо проявляются следы тектонической активности в течение четвертичного периода. В этом разделе представлены основные особенности тектонических характеристик района Ханоя [9, 134].

Город Ханой расположен в северо-западной части дельты р. Красной. История формирования и развития региона тесно связана с развитием тектонической зоны р. Красной. Начиная от города Вьетчи, дельта р. Красной была погружена вниз и постепенно расширялась на восток и юг. Формирование и развитие дельты Красной реки напрямую зависит от разломов северо-западного и юго-восточного простирания, таких как разломы р. Красной, р. Чаи, р. Ло и т. д. Ханой является переходной зоной между горами и равнинами. С тектонической точки зрения, большая часть территории Ханоя расположена в центре бассейна р. Красной, где сосредоточены активные тектонические разломы. По некоторым активным разломам, наблюдаются смещения до 5 мм, редко до 8 мм в год (В.Д. Чьонг и др., 1993; Н.Д. Суен и др., 1985, 1989, 2003) [127, 136].

Согласно материалам бурения впадина Красной реки формируется на земной коре континентального типа мощностью от 30 до 45 км, а на шельфе залива Бакбо (Тонкинского залива) – 30 км.

2.4.1. Тектонические разломы

Регион Ханоя является местом расположения крупнейших разломов (разлом реки Красной и разлом реки 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 [28, 121, 134].

Результаты исследований многих отечественных и зарубежных авторов позволяют предположить, что история формирования бассейна р. Красной



- Рисунок 2.4. Тектоническая схема территории г. Ханоя [9]

достигают 6 баллов по шкале Рихтера при глубине залегания очага 15–20 км [9, 121, 124, 134].

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.

2.5. Физико-механические свойства грунтов в сфере взаимодействия дамбы

В районе исследования четвертичные отложения вдоль дамбы Красной реки имеют такие же характеристики четвертичных отложений, как и весь район Ханоя. На основе собранных материалов и результатов лабораторных исследований можно определить закономерности распространения, состав и свойства грунтов в основании дамбы. В геологическом строении выделяются слои по следующим принципам: грунт является полиминеральным геологическим телом одного генезиса и геологического возраста с однородным литологическим составом, инженерно-геологической характеристикой и с одинаковой консистенцией.

Для исследования условий распространения и залегания водоносных комплексов, а также зон развития слабых грунтов автором построено 4 инженерно-геологических разреза по результатам бурения 72 скважин. Положение скважин вдоль дамб показано на рисунке 2.5. Из всех скважин 48 расположено на правом берегу р. Красной и 24 – на левом берегу, они имеют глубину от 0 до 70 м. На рисунке 2.6 показаны построенные инженерно-геологические разрезы.

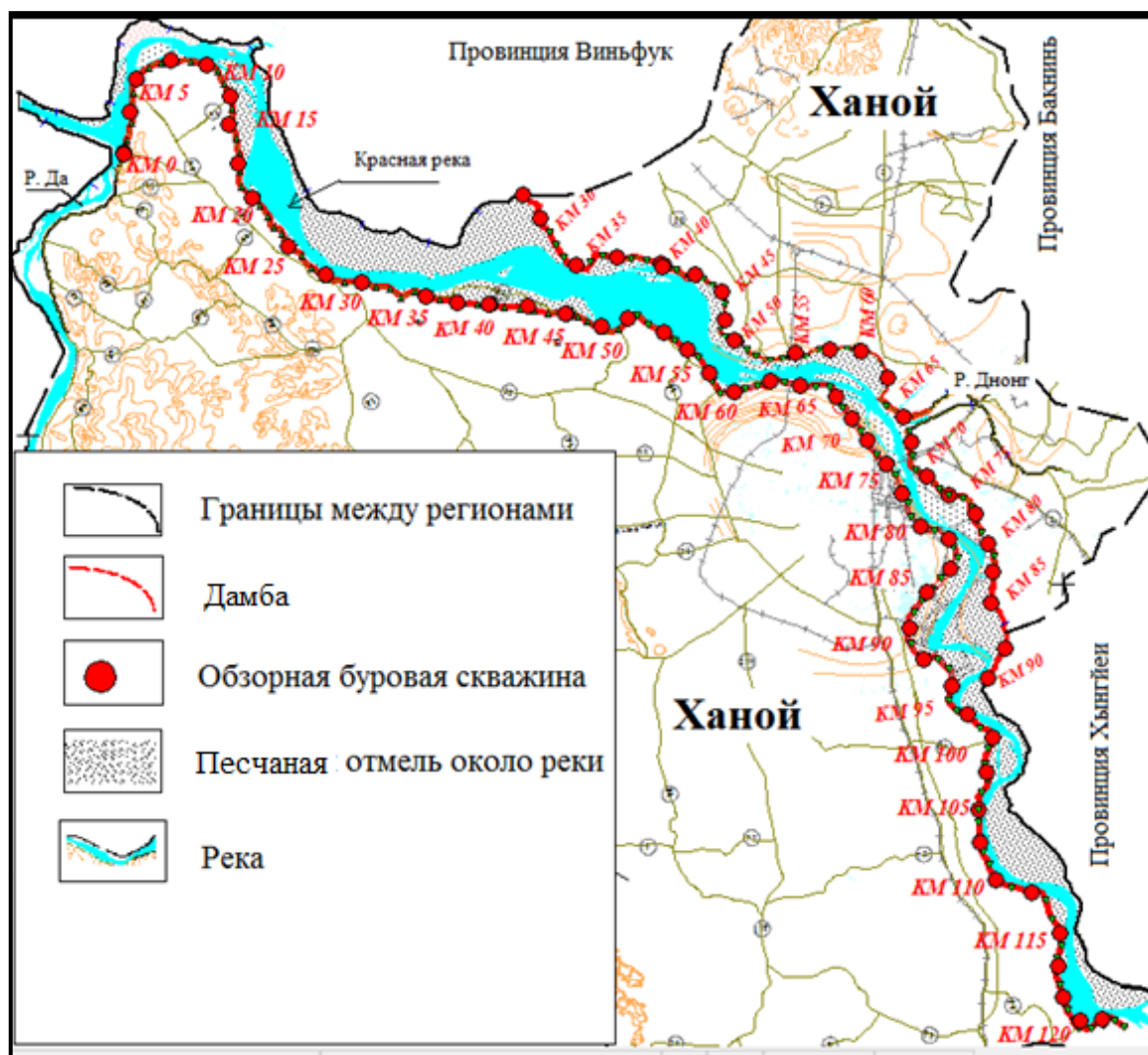


Рисунок 2.5. Расположение скважин вдоль дамбы р. Красной в Ханое

По вышеприведенному принципу разделения в пределах исследуемой территории вдоль дамбы Красной реки в Ханое стратиграфические подразделения описываются сверху вниз и показаны на геологическом разрезе. Распространение, мощность, уровень грунтовых вод показаны на рисунке 2.6.

Техногенные отложения

Насыпной грунт в этом районе имеет неоднородный, преимущественно суглинистый состав, чтобы сделать водонепроницаемый экран в основании дамбы. Техногенные грунты образовались поэтапно, при развитии экономики и строительства Ханоя.

Верхняя подсвита свиты Тхайбинь

+ **Слой 1:** Песчаные грунты русла реки и подвижной отмели имеют желто-коричневый, серо-желтый цвет, создают отмели и острова. Анализ состава 120 образцов песков показал, что средний гранулометрический состав руслового песка выглядит следующим образом (табл. 2.8). Аналитические данные показывают, что сортировка песка достаточно хорошая и он может быть использован как строительный материал. Мощность этого слоя резко изменяется по району работ с 0,5 м (районе Тханьчи) до 7,0 м (районе Хоангмай) или 12,0 м (районе Тайхо). Размерность частиц песка этого слоя постепенно уменьшается вниз по течению.

+ **Слой 2:** Суглинок, перемежающийся с супесями, коричневый, розовато-коричневый, мягкопластичный – эти аллювиальные отложения распределены по поверхности аллювиальных средних пляжей реки в местах (Дайдо, Фукца, Чунгха) и в низкоаллювиальном пляже по обоим берегам в районах Тхыонгкат, Даймач, Тамца, Тылиен, Лонгбиен, Тханьчи и Вандык, наибольшая площадь распространения находится на двух пляжах – Тамца и Вандык. Средняя мощность слоя варьируется от 2,0 до 4,0 м, особенно в нескольких местах, где мощность этого слоя составляет до 8,0 м (15 км). С глубиной повышается содержание крупнозернистой фракции, но все же имеет ритмичную закономерность распределения из-за существования различных циклов осадка. Физико-механические свойства второго слоя представлены в таблице 2.9.

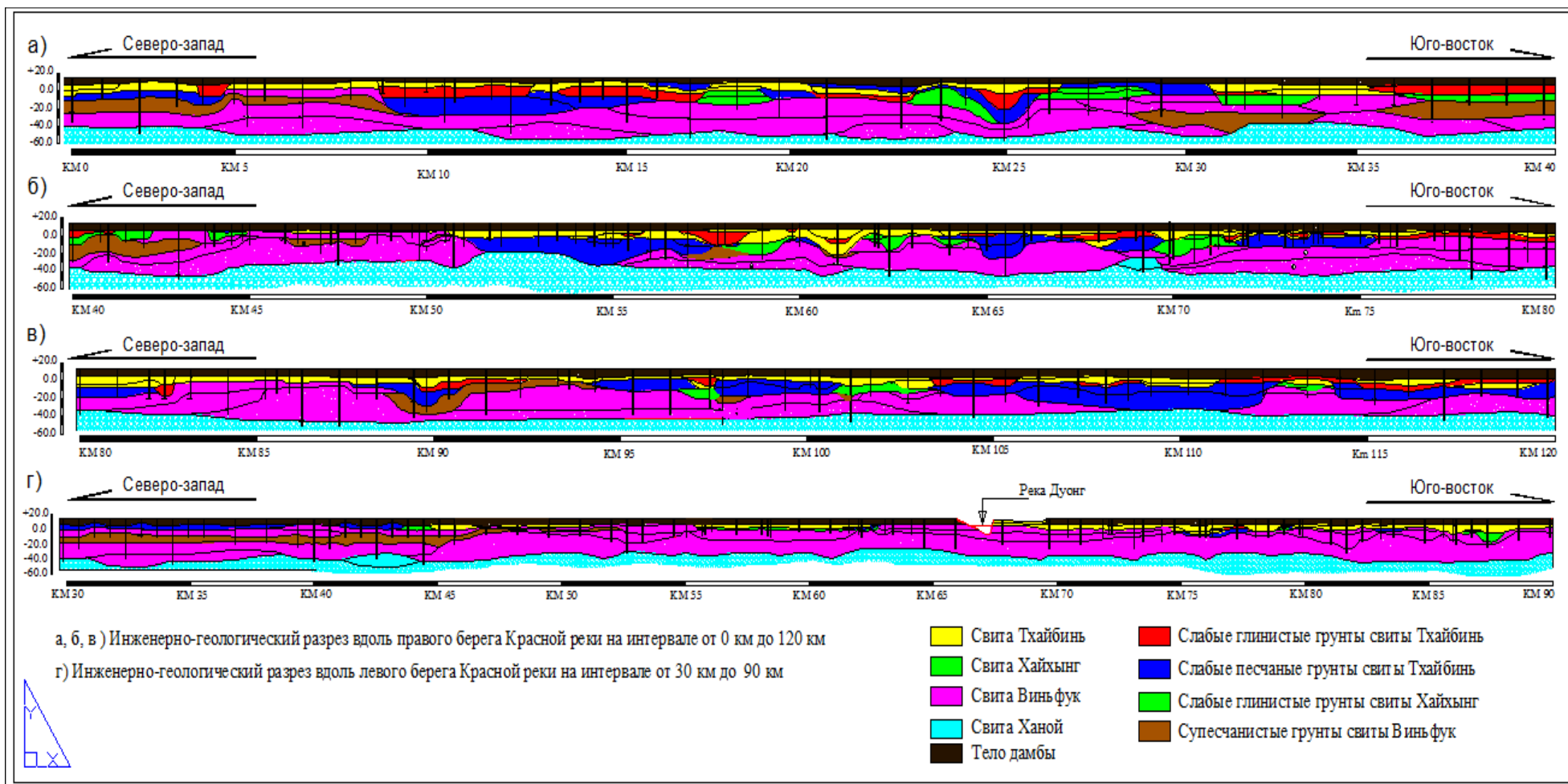


Рисунок 2.6. Инженерно-геологические разрезы вдоль дамбы Красной реки Ханоя

Таблица 2.8

Обобщенные показатели физико-механических свойств песчаных грунтов

Слой	Р									φ		К	R ₀	E ₀	N ₃₀
	%									φ _{вл}	φ _{сух}	м/сек	кПа	МПа	удар
	>10.0	10-5.0	5.0-2.0	2.0-1.0	1.0-0.5	0.25-0.5	0.25-0.1	0.1-0.05	<0.05						
1	-	-	-	2,7	7,1	58,8	25,3	6,1	-	26°40'	21°35'	2,2·10 ⁻⁴	120,0	10,0	12
3	-	-	-	1,7	5,8	46,8	36,5	6,1	3,1	25°30'	20°25'	1,8·10 ⁻⁴	100,0	16,0	8
5	-	-	-	3,0	7,0	46,8	30,2	10,0	3,0	27°20'	22°15'	2,5·10 ⁻⁴	120,0	18,0	7
10	-	-	-	0,3	5,7	27,1	45,6	12,9	8,4	28°30'	23°13'	1,5·10 ⁻⁴	127,5	26,0	13
11	-	-	-	0,4	5,3	25,8	43,3	15,2	10,0	31°08'	24°59'	3,5·10 ⁻⁴	150,0	28,0	14
17	-	-	-	2,5	5,0	28,0	43,8	16,0	4,7	30°40'	25°35'	2,8·10 ⁻³	180,0	32,0	28
18	-	-	-	2,8	14,1	31,1	31,3	10,7	10,0	31°29'	25°45'	4,8·10 ⁻²	300,0	33,0	33
20	45,7	16,7	14,6	7,2	4,2	-	-	-	11,8	-	-	7,8·10 ⁻²	300,0	42,0	

Где: W – Естественная влажность; ρ – Плотность грунта; ρ_s – Плотность частиц грунта; ρ_d – Плотность скелета грунта; e – Коэффициент пористости; n – Пористость; S_r – Степень влажности; W_L – Предел текучести; W_p – Предел раскатывания; I_p – Число пластичности; I_L – Показатель текучести; φ – Угол внутреннего трения; c – Удельное сцепление; m₁₋₂ – Коэффициент сжимаемости; E₀ – Модуль деформации; R₀ – Расчетное сопротивление грунта; Р – Гранулометрический состав; К – Коэффициент фильтрации; φ_{вл} – Угол внутреннего трения (Влажный); φ_{сух} – Угол внутреннего трения (Сухой); N₃₀ – Число ударов.

Таблица 2.9

Обобщенные показатели физико-механических свойств глинистых грунтов

Слой	W	ρ	ρ _d	ρ _s	e	n	S _r	W _L	W _p	I _p	I _L	φ	c	m ₁₋₂	E ₀	R ₀	K	P			N ₃₀
	%	г/см³	г/см³	г/см³	-	%	%	%	%	%	-	град.	кПа	10 ⁻³ м²/кН	МПа	кПа	м/сек	%			удар
																		2 -0.05	0.05 - 0.005	<0.005	
2	28,0	1,81	1,41	2,69	0,927	48,0	86,0	35,0	20,0 0	15,00	0,60	9°03′	21,0	0,408	7,8	140,0	2,5·10 ⁻⁷	28,0	53,0	19,0	7
4	33,3	1,81	1,51	2,69	0,981	49,53	91,3 2	34,95	19,4 5	15,50	0,62	11°02′	13,0	0,550	8,3	110,0	2,0·10 ⁻⁷	20,8	49,2	30,0	8
6	30,9	1,86	1,42	2,71	0,930	48,00	90,3 0	40,3	23,3 0	17,00	0,45	12°05′	24,0	0,470	10,9	160,0	1,2·10 ⁻⁸	11,5	27,0	61,5	10
7	30,2	1,86	1,44	2,08	0,881	47,00	92,8 0	41,05	24,7 5	16,30	0,34	11°42′	28,7	0,340	11,3	165,0	1,5·10 ⁻⁸	21,1	37,3	44,6	12
8	44,1	1,73	1,22	2,66	1,830	55,00	95,8 0	43,50	29,2 0	14,30	0,87	7°34′	12,0	0,670	2,0	70,0	0,7·10 ⁻⁸	28,8	43,5	27,7	3
9	30,9	1,83	1,37	2,66	0,941	49,00	90,7 0	33,70	24,2 0	9,50	0,78	12°28′	12,5	0,370	4,9	105,0	2,2·10 ⁻⁸	46,0	38,7	14,3	9
12	35,7	1,82	1,34	2,70	1,025	52,00	94,5 0	45,20	26,7 0	18,50	0,49	10°30′	26,5	0,450	8,8	151,0	1,2·10 ⁻⁸	14,3	48,8	37,1	6
13	55,0	1,64	1,02	2,58	1,48	61,00	95,8 0	49,60	33,0 0	16,60	1,32	5°20′	8,0	1,000	1,5	55,0	5,5·10 ⁻⁸	22,7	47,9	29,4	4
14	28,3	1,91	1,47	2,71	0,83	44,50	92,0 0	44,05	26,0 0	18,05	0,25	13°41′	32,5	0,250	15,5	185,0	0,7·10 ⁻⁸	27,1	40,1	32,8	13
15	36,4	1,76	1,39	2,67	1,069	51,70	90,9 0	38,00	25,2 0	12,80	0,88	10°40′	11,8	0,540	4,8	88,3	3,4·10 ⁻⁸	36,0	38,7	25,3	4
16	24,1	1,91	1,54	2,70	0,765	43,00	85,1 0	26,50	18,2 0	6,30	0,73	16°04′	17,8	0,206	14,1	160,0	5,5·10 ⁻⁸	57,6	28,3	13,1	12
19	29,5	1,77	1,37	2,68	0,961	49,0	82,3	34,2	22,3	11,9	0,61	9°13′	15,5	0,63	4,8	90,0	1,0·10 ⁻⁸	26,6	52,4	21,0	8

+ **Слой 3:** Мелкий-тонкозернистый водонасыщенный буровато-серый песок, рыхлого сложения. Этот слой залегает ниже второго в пределах аллювиальных средних отмелей реки и низких аллювиальных пляжей по обоим ее берегам. Отложения слоя слагают указанные геоморфологические структуры. Мощность слоя может очень сильно изменяться от 3,5 до 17,0 м. Содержание крупнозернистой фракции постепенно увеличивается по глубине в скважинах. Физико-механические свойства этого слоя так же представлены в таблице 2.8.

+ **Слой 4:** Суглинок с прослоями супеси, темно-коричневый, серо-коричневый, мягкопластичный. Этот слой в основном распространен за пределами дамбы по обоим берегам реки в районе исследования. Простирается от верховья до низовья в районах Тханьчи (коммуны Ванфук, Дуйенха, Йенми, Йенсо, Линьнам), районах Гиялам (коммуны Вандык, Донгды, Лонгбйен). Этот слой широко распространен и уменьшается в коммунах Тамца, Нхаттан и Тылйен. В коммунах Даймач и Тхыонгкат этот слой делится на две узкие полосы. Мощность этого слоя варьируется от 3,0 до 5,0 м, реже до 12 м (на 69,2 км левобережья Красной реки). На склоне берега р. Красной в районе Хайбой мощность может достигать 5,0 м. Неоднородность грунтов этого слоя влияет на их устойчивость к оползневому процессу. Физико-механические свойства этого представлены в таблице 2.9.

+ **Слой 5:** Мелкий, тонкозернистый водонасыщенный желтый, золотисто-коричневый песок, средней плотности. Эти отложения залегают ниже четвертого слоя и имеют речное происхождение. Зона распространения пласта находится в основном на аллювиальных берегах реки, а мощность сильно варьируется от 1,0 до 7,0 м. Этот слой простирается на участках дамбы 15,5–17,3 км; 20,5–24,9 км; 25,4–30,7 км на правом берегу р. Красной и 30,0–39,5 км; 40,5–42,5 км на левом берегу р. Красной. Физико-механические свойства этого слоя представлены в таблице 2.8.

+ **Слой 6:** Глина коричневая, серо-коричневая, полутвердая. Широко распространена на высоких террасах вдоль подошвы дамбы. В некоторых

районах этот слой простирается от подножия дамбы до берега реки, например, коммуны Лиенмак, Донгнгак, Футхыонг, Чыонгдыонг, Бачданг, Тханьлыонг и Дуйенха (на правом берегу Красной реки); Нгоктхю, Батчанг и Кимлан (на левом берегу р. Красной). Слой относительно однороден по составу, его устойчивость к оползневому процессу намного лучше, чем у молодых отложений, средняя мощность 5–7 м, в некоторых местах до 13 м (на 75,2 км левого берега р. Красной). Физико-механические свойства этого слоя приведены в таблице 2.9.

Нижняя подсвета свиты Тхайбинь

+ **Слой 7:** Переслаивание глины с суглинком коричневым, желтовато-коричневым, тугопластичные. Очень широко распространен внутри дамбы (защищенная дамбой территория) и залегает на поверхности земли. Этот слой грунта может быть встречен вне дамбы и под шестым слоем. Мощность слоя варьируется от 1,0 до 12,5 м. Этот слой грунта является водопором в основании дамбы, поэтому высокая его мощность играет важную роль в обеспечении стабильности системы дамб и областей за дамбой. Физико-механические свойства седьмого слоя приведены в таблице 2.9.

+ **Слой 8:** Серо-коричневый суглинок с небольшим содержанием органики, текучепластичный. Это слабый слой грунта, распространенный на правом берегу р. Красной и в основании дамбы в местах, показанных на инженерно-геологическом разрезе правого берега р. Красной (рис. 2.6). За речной отмелью в районе Тханьчи этот слой грунта относительно широко распространен в коммунах Линьнам, Йенсо, Йенми и Дуйеха. На левом берегу р. Красной этот грунт встречается только в местах, показанных на инженерно-геологическом разрезе левого берега р. Красной (рис. 2.6). Мощность слоя варьируется от 2,0 до 15,4 м, в среднем 7,2 м. Наличие этого грунта в основании дамбы является причиной неравномерной осадки основания и деформаций в теле дамбы. Физико-механические свойства этого слоя приведены в таблице 2.9.

+ **Слой 9:** Суглинок, переслаивающийся с супесью, серо-коричневый, мягкопластичный. Этот слой широко распространен в основании дамбы в местах, показанных на инженерно-геологическом разрезе правого берега р. Красной (рис. 2.6). Мощность варьируется от 2,3 до 13,5 м, в среднем 6,6 м. Этот слой расположен ниже седьмого слоя, в некоторых местах ниже пятого. Его физико-механические свойства показаны в таблице 2.9.

+ **Слой 10:** Мелко-тонкозернистый серо-коричневый песок, средней плотности. На левом берегу р. Красной этот слой грунта встречается только в основании дамбы на интервале 75,0–77,5 км с небольшой мощностью (2,5 м). Он распространен в нескольких местах в отмели и основании дамбы в районах Тхыонгкат, Йенфу, Фуктан, Чыонгдыонг с мощностью от 4,0 до 7,0 м. В основном слой простирается в больших масштабах на большой глубине в основании дамбы и речном руслу в районе Тханьчи на интервалах 72,5–78,0 км и 80,0–83,0 км. Средняя мощность 10,0–15,0 м, в районе моста Тханьчи может быть до 25 м и более. Этот слой в водонасыщенном состоянии очень чувствителен к динамическим нагрузкам, что также является одной из причин разрушения свай при строительстве моста Тханьчи. Физико-механические свойства слоя приведены в таблице 2.8.

+ **Слой 11:** Мелкозернистый песок серо-зеленый, серо-коричневый, средней плотности, иногда с примесью мелкого гравия или с прослоями супеси, распространен неравномерно в прибрежных районах левого берега Красной реки. Встречается только в основании берега реки в коммуне Лонгбьен на интервале 30,0–39,0 км с мощностью 5,0–10,0 м.

На правом берегу р. Красной этот слой широко распространен в речной отмели и в основании дамбы от района Нхаттан до Тэйхо, коммуны района Тханьчри (50,0–58,0 км), имеет среднюю мощность от 10,0 до 20,0 м. Это важный проницаемый слой основания дамбы вблизи поверхности земли, поэтому в области распространения этого слоя грунта было много случаев деформации из-за фильтрации под основанием Ханойской дамбы. Физико-механические свойства этого слоя приведены в таблице 2.8.

Средняя подсвета свиты Хайхынг

+ **Слой 12:** Глина серо-зеленая, мягкопластичная. Этот слой очень ограничен в области изучения. На левом берегу р. Красной район исследования обнаружен только в местах района Гиялам, мощность 2,0–2,7 м. На правом берегу р. Красной этот слой появляется в некоторых местах в основании дамбы в районе Тханьчи и вне речной отмели в коммуне Дуйенха. Мощность слоя варьируется от 2,4 м до 5 м. Поскольку площадь распространения невелика, ее влияние на устойчивость берега реки и основание дамбы незначительно. Его физико-механические свойства приведены в таблице 2.9.

Нижняя подсвета свиты Хайхынг

+ **Слой 13:** Глина темно-серая с органикой, текучая. Это основной слабый грунт исследуемой территории, но он имеет небольшое распространение по обоим берегам реки. На левом берегу р. Красной распространен на интервалах 56,0–61,5 км и на речной отмели в районе коммуны Хоммой, Дайбанг, Кимлан и Гиялам с мощностью от 1,5 до 2,5 м. На правом берегу р. Красной распространен в основании дамбы и близко к поверхности земли в районе коммуны Тхыонгкат и Лиенмак и в городских округах и районе Тханьчи. Он показан на инженерно-геологическом разрезе (рис. 2.6). Этот слой лежит под слоями 7, или 9 или слоем 12 в виде больших линз, потому что мощность слоя варьируется очень сильно и внезапно может изменяться от 0,4 до 20,5 м. Наличие этого слоя в основании дамбы в виде линз является причиной неравномерной осадки тела дамбы и деформации ее поверхности. Физико-механические свойства этого слоя приведены в таблице 2.9.

Свита Виньфук

+ **Слой 14:** Глина желто-коричневая, серо-белая, пятнистая, полутвердая. Этот слой распространен относительно широко, но не непрерывно из-за денудационного рельефа его поверхности в исследуемой области. Это хороший водонепроницаемый слой, имеющий высокую несущую

способность для инженерных сооружений, относительно устойчивый воздействию фильтрационного потока.

На левом берегу р. Красной в основании дамбы на интервалах 50,0–56,0 км и 62,5–65,0 км (устье реки Дуонг) 14 слой залегает близко к поверхности земли или под слоем 7, мощность варьируется от 3,0 до 12,0 м. В районе Гиялам кровля слоя 14 расположена на глубине 5,0–8,0 м и на интервалах 67,0–75,0 км, и 82,0–83,0 км, мощность варьируется от 4,0 до 9,0 м. На берегу реки он простирается узкими полосами вдоль дамбы на интервалах от 50,0–56,0 км, и от 62,0–64,0 км (район Донгань), 64,0–67,5 км (район Гиялам), но в низовье дамбы слой 14 был сильно разрушен, оставшись лишь на некоторых участках с незначительным распространением.

На правом берегу р. Красной в основании дамбы на интервалах 48,0–58,5 км в районах Тылием и Тайхо этот слой находится близко к поверхности земли. Здесь на его поверхности происходит эрозия на интервалах 48,0–50,0 км и 52,0–53,0 км, мощность варьируется от 3,0 до 15,0 м. Вдоль дамбы в районах от Футхыонг до Тханьчи (58,5–69,5 км) он отсутствует. В районе Фусьен вдоль дамбы 14-й слой появляется на 69,5–72,5 км и 82,0–85,0 км, кровля слоя залегает от 6,0 до 22,0 м, но в нескольких местах на глубине от 3,0 до 6,0 м от дневной поверхности земли. Мощность 14-ого слоя сильно варьируется от 3,0 до 15,0 м. Физико-механические свойства этого слоя приведены в таблице 2.9.

+ **Слой 15:** Суглинок темно-серый с содержанием органики, текучепластичный. Этот слой распространен на очень маленькой площади в районе Ханоя, в пределах которой вдоль дамбы и берега реки он встречается только на 79,2 км (в районе Тханьчи) с глубиной залегания от 25,0 до 29,0 м от поверхности. Его физико-механические свойства приведены в таблице 2.9.

+ **Слой 16:** Супесь, переслаиваемая глинами желто-серыми, пластичная. Вдоль берега р. Красной в Ханое 16-й слой в основном распространен в основании дамбы в районе Донгань и Тылем. На левом берегу р. Красной он залегает ниже 14-ого слоя на интервалах 48,0–50,0 км и 51,0–

53,0 км со средней мощностью 2,0–4,0 м. В районе Тылем 16-ый слой залегал ниже 14-го слоя на 51-ом км в форме линзы и на интервале 54,0–56,0 км мощностью от 5,0 до 8,0 м. Кроме того, 16-й слой также встречается в коммуне Линьнам в районе Тханьчи с мощностью 8,5 м. Его физико-механические свойства приведены в таблице 2.9.

+ **Слой 17:** Песок мелкий, коричневый и желто-коричневый. Этот слой распространен относительно широко, но прерывисто на обоих берегах Красной реки в районе исследования, глубина распространения поверхностного слоя постепенно уменьшается вдоль дамбы от Донгань до Тханьчи. В районе Донгань 17-ый слой залегал ниже 14-ого или 16-ого слоев. В районе Тханьчи 17-ый слой обычно залегал ниже 11-ого. Это водоносный горизонт в районе исследования, где происходит деформация из-за фильтрации в основании дамбы. Мощность 17-ого слоя в районе исследования сильно варьируется от 3,3 до 20,5 м. Его физико-механические свойства приведены в таблице 2.8.

+ **Слой 18:** Песок среднезернистый, серо-желтый, серо-белый. Этот слой очень повсеместно распространен (за исключением некоторых мест с дочетвертичным палеоруслом р. Красной, например, в районе Тайхо), его мощность увеличивается с севера на юг по направлению стока р. Красной. Однако, глубина залегания кровли 18-ого слоя очень сильно изменяется на небольшой площади, создавая турбулентное движение подземного потока в основании дамбы во время наводнений. Это важный водоносный горизонт в основании дамбы, он создает опасность для дамб и берегов рек в период наводнений. Мощность 18-ого слоя варьируется от 4,0 до 20,0 м, в среднем 15,0 м. Физико-механические свойства этого слоя приведены в таблице 2.8.

Свита Ханой

+ **Слой 19:** Суглинок, переслаивающийся с супесью, серо-коричневый, серо-зеленый, мягкопластичный, с небольшим содержанием органики и гравия. Этот грунт залегает в верхней части свиты Ханой и очень редко встречается по всему городу Ханой. Этот слой находится лишь очень небольшими локальными

участками на юге дельты р. Красной. В пределах района вдоль берегов р. Красной он вскрыт скважинами только в районе Линьнам на глубине 38,5–52,0 м, а в районе Зиалам вскрыта его кровля с глубины 47,5 м. Физико-механические свойства этого слоя приведены в таблице 2.9.

+ **Слой 20:** Гравийно-галечные отложения, водонасыщенные, местами сложены серыми, желтовато-серыми крупнозернистыми песками, плотными. Этот слой широко распространен по всему городу Ханой, встречен на всей территории исследования. Подстилающими породами являются песчаники, алевролиты, выветрелая глина неогеновой свиты. Кровля 20-ого слоя падает с севера на юг по направлению потока реки от района Донгань до Тханьчи.

На левом берегу р. Красной глубина залегания кровли 20-ого слоя в районе Донгань составляет от 20,0 до 25,0 м, а в районе Гиалам глубина составляет от 35,0 до 45,0 м. На левом берегу Красной реки, в районе Тылием, глубина залегания кровли составляет от 30,0 до 35,0 м и увеличивается до 40–50 м в центральной части города. Особенно в районе озер Хотай и Чукбач 20-ый слой залегает в 15-ти метрах от поверхности земли. Его мощность варьирует от 20,0 до 45,0 м. Физико-механические свойства этого слоя приведены в таблице 2.8.

2.6. Гидрогеологические условия

На основе условий залегания, литологического состава, происхождения пластов и гидрогеологических характеристик, таких как: площадь распространения, глубина залегания, мощность, состав воды, проницаемость, гидродинамические характеристики, динамика подземных вод – в исследуемом районе можно выделить следующие гидрогеологические подразделения.

Голоценовый водоносный горизонт

Голоценовый водоносный горизонт на территории вдоль р. Красной сформирован со слоями 1, 3, 5, 10 и 11, которые имеют гидравлическую связь с рекой. Где слой 1 и слой 3 (аллювиальный песок) залегают в русле реки, а слой 5 – под первым водоупором перед дамбой, слои 10 и 11 распространены

в основании дамбы, но имеют гидравлическую связь с рекой (на интервале 49,3–56,5 км правого берега р. Красной).

На левом берегу р. Красной вдоль дамбы, слои 10 и 11 присутствуют только на интервалах 60,6–61,3 км, 69,0–70,0 км и 71,5–72,5 км. На остальных участках слои 10 и 11 отсутствуют.

На правом берегу р. Красной вдоль дамбы, слои 10 и 11 отсутствуют на интервалах от 48,0 км до 59,0 км. Голоценовый водоносный горизонт имеет прерывистое распространение на интервалах 59,0–66,0 км, 68,2–77,5 км, 80,0–83,0 км. Слои 10 и 11 часто близко располагаются к поверхности земли, это приводит к повреждению дамбы во время сезона паводков.

Голоценовый водоносный горизонт напрямую связан с р. Красной, поэтому уровень грунтовых вод в этом районе зависит от ее уровня. В сезон дождей питание водоносного горизонта происходит из реки и направление потока подземных вод, соответственно, направлено от реки, и наоборот, в сухой сезон, водоносный горизонт питает реку.

В сезон дождей пьезометрический уровень расположен выше поверхности земли, поэтому вода в колодцах вдоль дамбы часто самоизливается. Если фильтрационный поток протекает через колодец с высокой интенсивностью и большой продолжительностью, возникает суффозионный процесс и наблюдаются прорывы плывунов через колодцы на поверхность земли. Это является основной причиной разрушения основания дамбы в прилегающих внутренних районах (этот случай произошел в Сентиу в сезон паводков в 1986 году – колодец в районе Фуктхо).

Водоносный горизонт используется только отдельными домохозяйствами, а для предприятий потенциальные запасы воды этого горизонта невелики.

Коэффициент фильтрации водоносного горизонта высокий или очень высокий, расход воды варьируется от 20,0 до 790,0 м³/сут, в среднем от 200 до 400 м³/сут. Удельный расход воды в водозаборной скважине варьируется от 0,2 л/с до 3,1 л/с, средний 1 л/с.

Качество воды водоносного горизонта в районе исследования вдоль Красной реки очень хорошее, загрязнения отсутствуют. Вода пресная, жесткость обычная от мягкой до средней, в основном в форме бикарбоната кальция-магния, не агрессивная к строительным материалам.

Плейстоценовый водоносный горизонт

Плейстоценовый водоносный горизонт состоит из слоев 17, 18, 20 и распространен широко на всей территории района вдоль р. Красной в Ханое. Это один из самых важных водоносных горизонтов Ханоя с большими запасами для всего города.

На побережьях р. Красной плейстоценовый водоносный горизонт залегает вблизи земной поверхности.

Питание водоносного горизонта q_p происходит в основном из р. Красной. Основное движение воды из р. Красной в этот водоносный горизонт происходит через литологические окна и из-за разницы отметок уреза реки с пьезометрическим уровнем подземных вод. Отложения этого горизонта имеют очень высокую проницаемость (расход воды в скважине в коммуне Чыонгдыонг – 4104 м³/сут, в коммуне Донгань – 6105 м³/сут). Удельный расход воды в водозаборной скважине варьируется от 1,5 л/с до 3,0 л/с, средний 1 л/с., в некоторых случаях имеет очень большое значение от 7,0 до 8,0 л/с, например, в скважинах в коммуне Чыонгдыонг расход составил 7,6 л/с, в коммуне Донгнгак – 4,57 л/с.

Мягкая вода не агрессивна к бетону и другим строительным материалам, с высоким содержанием железа, в среднем 10–20 мг/л.

Голоценовый водоупор

В прирусловой части реки (перед дамбой), верхний водоупор состоит из слоев 2, 4, 6. Во внутренней области дамбы, в местах, где присутствует голоценовый водоносный горизонт, верхний водоупор состоит из слоя 7 или из слоев 7, 8, 9.

В остальных районах, где присутствует только один плейстоценовый водоносный горизонт, верхний водоупор разнообразен и может состоять из

двух слоев 7 и 14 (районы Донгань и Гиялам) или из нескольких: слоев 7, 8, 9, 16 (69,0 км на правом берегу р. Красной); слоев 7, 13 и 14 (на интервале 83,5–85,0 км правого берега).

Верхний водоупор выполняет функцию защиты дамбы от деформаций из-за фильтрации в основании дамбы в сезон дождей. В тех местах, где верхний водоупор нарушается (колодцы, озера и пруды вдоль дамбы) или имеет маленькую мощность, фильтрационные процессы в основании дамбы угрожают ей дестабилизацией.

Плейстоценовый водоупор

Водоупором между голоценовым и плейстоценовым водоносными горизонтами являются, в основном, глинистые и суглинистые отложения слоев 12, 13 и 14, в которых слой 14 является лучшим водоупорным свойством. В районах без водоносного горизонта q_h , они соединяются с поверхностным водоупором. В подрусловой зоне р. Красной этот водоупор размывает полностью или частично, что создает гигантское гидрогеологическое окно, соединяющее два водоносных горизонта q_h и q_p . Поскольку русло р. Красной часто меняло свое положение по площади и глубине в ходе геологического развития, вышеупомянутый водоупор сильно раздроблен на фрагменты в области вдоль р. Красной. Из-за этого два водоносных горизонта q_h и q_p в прибрежной зоне могут рассматриваться как объединенный водоносный комплекс, который постоянно и непосредственно питается водой р. Красной. Данные мониторинга поверхностных и подземных вод на мониторинговых скважинах внутри дамбы показывают, что уровень воды в реке и уровень грунтовых вод меняются очень пропорционально друг другу.

2.7. Проявления экзогенных и инженерно-геологических процессов

Во все времена реки играли очень важную роль в развитии человеческого общества. Человеческая цивилизация использовала их для взаимной коммуникации [23, 53]. Реки приносят как пользу, так и катастрофы человечеству,

в том числе наводнения, эрозию и обмеление русел. Эти процессы всегда угрожали безопасности жилых территорий, прибрежных сооружений, экологической обстановке и т. д.

Дамба защищает жилую территорию от затопления во время паводков. Под влиянием возникающего гидравлического градиента в насыпи дамб при их эксплуатации возникают опасные геологические процессы. При эксплуатации дамб их устойчивость зависит не только от инженерно-геологических условий, но и от взаимодействия дамбы с рекой во времени.

Парагенезис экзогенных геологических процессов в ПТС «Дамба» наблюдается только один. Он проявляется на естественных берегах р. Красной за пределами дамбы. В него входят: боковая эрозия сильно меандрирующей реки, оползание и обрушение пород поймы, суффозия.

Форма русла реки изменяется из-за ряда причин, влияющих на эрозионный процесс. Геологическое строение непосредственно влияет на процесс эрозии. Механизм эрозии может быть разделен на следующие типы:

+ Эрозия вследствие размыва, когда уровень воды в реке поднимается с большой скоростью. Скорость эрозии берега зависит от геологического строения берега, скорости фильтрационного потока и физико-механических свойств горных пород, слагающих берег. В.Д. Ломтадзе считал, что при оценке и прогнозе развития эрозионных процессов необходимо сравнивать фактическую или периодическую скорость течения реки во время половодий и паводков с допустимой (не размывающей) скоростью для пород, слагающих тот или иной участок берега и русла реки. Если фактическая или возможная скорость, больше допустимой для рассматриваемых горных пород ($V_{\text{факт}} > V_{\text{доп}}$), подмыв и разрушение берегов и русла неизбежны [21]. На участках с неблагоприятным геологическим строением, сложенных рыхлыми грунтами (песком или супесью), эрозия происходит часто и с высокой интенсивностью.

Таким образом, когда допустимая скорость размывания ($V_{\text{доп}} = 0,25\text{--}0,6 \text{ м/с}$) рыхлого грунта меньше, чем скорость потока, его воздействие вызывает разрушение и потерю устойчивости берега реки.

+ Эрозия вследствие обвала берега: при низком уровне воды реки (в сухой сезон) или после окончания половодья (в сезон дождей), уровень воды в реке снижается (ниже минимального), а фильтрационный поток в грунтах направлен к руслу реки. Фильтрационный поток с неравномерным гидродинамическим давлением и высокой скоростью разрушает берег в нижних его частях. Этот процесс способствует быстрому разрушению береговой линии. Этот тип эрозии распространен на участках, сложенных несвязными грунтами.

+ Эрозия вследствие оползания берега реки наблюдается, когда в литологический состав берега реки входят слабые грунты (такие как ил, торф, ил с песком и др.), а в сезон дождей состояние грунтов переходит в водонасыщенное. При быстром падении уровня паводковой воды с появлением подземного потока от подошвы дамбы в направлении русла реки, берег реки теряет равновесное состояние и внезапно может произойти его оползание. Этот механизм эрозии часто встречается на берегах рек, сложенных из многослойных неоднородных грунтов со значительным углом склона.

Возникновение одного или всех вышеуказанных типов эрозии возможно на всех участках береговой линии р. Красной. Именно из-за этого механизм эрозии и ее форма также остаются различными на всем протяжении побережья.

Деформации дамбы являются следствием развития в сфере ее взаимодействия ряда *инженерно-геологических процессов*. Основными проявлениями процессов являются:

+ Фильтрация через тело и основание дамбы и связанные с ней процессы суффозии и гидродинамического разрушения грунтов основания дамбы (плывуны) [20].

+ Оползание откосов дамбы.

Фильтрация через основание и тело дамбы

Процесс фильтрации через основание и тело дамбы представляет собой гидродинамический геологический процесс. Он вызывает много неприятностей во время строительства и эксплуатации, например, разрушение

при высокой интенсивности фильтрационного потока. Уровень воды р. Красной постепенно повышается в период паводка и процесс фильтрации через тело и основание дамбы ускоряется.

Дамбы исторически оказались построенными в сложных инженерно-геологических условиях, что привело к повышению вероятности возникновения оползневого процесса на некоторых ее участках и экономическому ущербу в случае аварий. Подземные потоки в основании дамбы формируются обычно в тех местах, где были расположены древние русла реки и водоносные горизонты имеют гидравлическую связь с современной рекой.

В водоносных горизонтах залегают слои крупнозернистых грунтов, сложенных из песка, гальки и гравия. В тех случаях, когда они расположены вблизи поверхности земли, во время наводнения возникает более высокое фильтрационное давление в основании дамбы. При его увеличении, устойчивость дамбы полностью зависит от мощности слоев глинистых грунтов ее основания: чем она больше, тем выше устойчивость дамбы. Такая зависимость приводит к ряду опасных экзогенных геологических процессов в ее основании, в том числе, к суффозии, пlyingунам, разрушению основания дамбы и т. д.

Последнее представляет собой результат влияния основных процессов (суффозии, пlyingунов) [1, 20, 21, 22, 35, 52], которые развиваются вдоль системы дамб во время наводнений. Это наиболее опасные процессы, которые серьезно угрожают устойчивости дамб.

В особых случаях, разрушение основания оказывается достаточно серьезным, при возведении дамбы на грунтовом основании, сложенном несвязными грунтами с большим коэффициентом фильтрации.

Оползни в откосах дамбы и разрушение земной поверхности на защищенной территории

Оползневой процесс очень распространен в земляных сооружениях, имеющих откос. Он представляет собой смещение масс горных пород по

склону под воздействием собственного веса и дополнительной нагрузки вследствие переувлажнения, сейсмических воздействий, подмыва склона и других процессов, вызывающих неустойчивость сооружений [6, 21]. Однако оползни откоса дамбы и разрушение ее основания из-за вертикальных деформаций ее тела также зависят от гидродинамического давления фильтрационного потока. Под его воздействием, вследствие отсутствия предварительного уплотнения и укрепления грунтового основания дамбы во многих местах его заложения, как основание, так и откос дамбы, могут быть разрушены [137].

Тело дамбы является неоднородным из-за дефектов, возникших в силу разных причин в течение многих лет. Существуют зоны повышенной проницаемости дамбы, по которым образовывается гидравлическая связь, способствующая перетеканию воды. При этом, в месте высокой интенсивности фильтрационного потока возникает механический вынос частиц грунта и ослабление поверхности скольжения откоса, приводящее к активизации оползневого процесса.

Поверхность скольжения в теле дамбы может возникать как на внутреннем, так и на внешнем откосах. Оползень на внутреннем откосе часто происходит вследствие увеличения давления фильтрационного потока в теле дамбы в ходе паводка [70]. Градиент фильтрационного потока достаточно велик для того, чтобы вызвать суффозию. В случаях резкого понижения уровня паводковых вод, оползень возникает на внешнем откосе.

Разрушение основания дамбы часто случается в тех случаях, когда оно залегает на слабых грунтах. При повышении уровня паводковых вод, возникает фильтрационный поток, протекающий в основании дамбы, а также повышается фильтрационное давление, в результате которого происходит разрушение уже земной поверхности на защищенной территории из-за развития плывунов [115].

Осадка и деформации тела дамбы

Осадка дамбы и трещинообразование в ее теле являются следствием изменения состояния слабых грунтов основания.

Трещины тела дамбы образуются в тех местах, где сосредоточены фильтрационные потоки, протекающие через тело дамбы, это явление может быть объяснено тем, что фильтрационные потоки изменяют текстуру или структуру грунтов. Осадка дамбы может оказаться либо мгновенной, либо длительной, это зависит от процесса консолидации грунтового основания.

Существует большое количество причин, вызывающих осадку и трещины в теле дамбы, их можно разделить на два основных типа:

- + первичная консолидация грунта;
- + вторичная консолидация грунта.

Например, трещины в теле дамбы появились в 1986–1990 годах в районе Хай Бой, Донг Ань. Трещины шириной 0,25–0,3 м и длиной 6–10 м простирались через тело дамбы и тянулись до берега реки, трещины развивались в суглинистом слое мощностью 3–5 м. Чинь К.Х. [139] считает, что причина трещинообразования тела дамбы обусловлена наличием мелкозернистого песчаного слоя под глинистым и суглинистым. В данном случае, возможно стоило поискать причину в тектонических движениях по разломной структуре. В сухой сезон уровень воды в реке падает низко, поэтому наблюдается обратный фильтрационный поток в основании дамбы в р. Красную, порождающий суффозию. В разуплотненных грунтах происходит вторичная консолидация, основание ослабевает и теряет устойчивость, вследствие этого образуются трещины вдоль фильтрационных потоков.

Для устранения отрицательного воздействия осадки и иных деформаций в теле дамбы, главные решения должны быть сосредоточены на регулировании движения фильтрационного потока, что пока затруднительно.

На протяжении дамбы эти процессы соотносятся друг с другом по-разному. По преобладанию того или иного процесса ПТС «Дамба» может быть

сегментирована на отрезки, которые в свою очередь по доминирующим признакам могут быть объединены в соответствующие типы. Результаты этого анализа приведены в разделе 3.9.

2.8. Инженерно-геологическое строение дамбы р. Красной

Дамба р. Красной в районе Ханоя расположена на неоднородном и сложном по геологической структуре основании. Она подвержена прямому и частому воздействию ежегодных паводковых вод. Дамба защищает жилую территорию от затопления. Под влиянием гидравлического градиента в насыпи дамб при их эксплуатации могут возникнуть опасные геологические процессы. При эксплуатации дамб их устойчивость зависит не только от инженерно-геологических условий, но и от взаимодействия дамбы с рекой во времени, поэтому на любых участках дамб могут появиться ряды геологических проблем: потеря устойчивости откоса дамбы, разрушение основания дамбы; неравномерная осадка; пlyingуны, суффозия.

Хозяйственная и строительная деятельность в непосредственной близости от дамбы (добыча песка в районе около дамбы, использование поверхности дамбы для прокладки дороги) в сочетании с природными условиями создают благоприятные условия для развития экзогенных и инженерно-геологических процессов, которые серьезно угрожают устойчивости системы дамб, таких как: неравномерная осадка, трещинообразование на поверхности и откосах, фильтрация через тело и основание, оползни, суффозия и прорыв пlyingунов со стороны внутреннего откоса дамбы и т. д.

Система дамб р. Красной в районе Ханоя имеет общую длину 120 км. Их схема показана на рисунке 2.5. Протяженность дамбы на левом берегу р. Красной составляет около 60 км, начиная от 30,0 км (район Мелинь) до 90,0 км (район Батчанг). Протяженность дамбы на правом берегу р. Красной составляет около 120 км, начиная от нулевого километра (коммуна Содо,

район Бави), до 120,0 км (коммуна Куангланг, район Фусюйен). Поперечный разрез дамбы показан на рисунке 2.7 [120, 136].

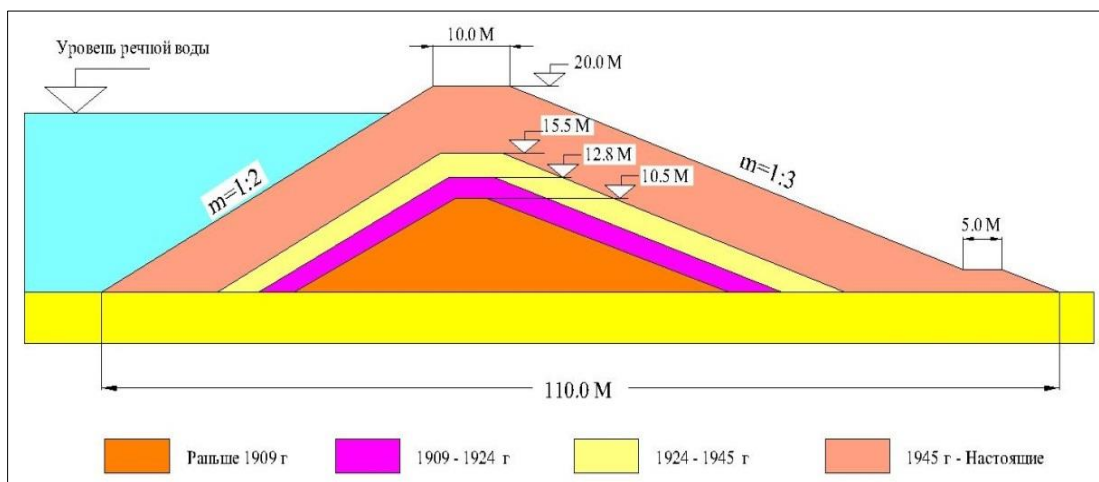


Рисунок 2.7. Схема поперечного сечения дамбы

На первом этапе строительства дамбы, ее высота была недостаточной для предотвращения наводнений, которые происходили ежегодно. Со временем высоту дамбы постепенно увеличивали, чтобы предотвратить их. Несмотря на то, что дамба р. Красной играет очень важную роль в борьбе с наводнениями, она по сей день сооружается ручным способом, а строительный материал насыпи дамбы (глинистый грунт) добывается в непосредственной близости от нее. Физико-механические свойства материала в теле дамбы приведены в таблице 2.10. Основание дамбы не было укреплено или уплотнено до строительства каким-либо способом. Активизация опасных экзогенных геологических и инженерно-геологических процессов связана с изменениями (повышение, понижения) уровня реки.

Таблица 2.10

Показатели физико-механических свойств строительного материала в теле дамбы

W	ρ	ρ_d	ρ_s	φ	c	m_{1-2}	E_0	R_0	K
%	г/см ³	г/см ³	г/см ³	град.	кПа	10^{-3} м ² /кН	МПа	кПа	м/с
21.0	2.10	1.65	2.71	22°18'	27.5	0.205	12,5	170.5	1,5·10 ⁻⁸

Где: W – Естественная влажность; ρ – Плотность грунта; ρ_s – Плотность частиц грунта; ρ_d – Плотность скелета грунта; φ – Угол внутреннего трения; c – Удельное сцепление; m_{1-2} – Коэффициент сжимаемости; E_0 – Модуль деформации; R_0 – Расчетное сопротивление грунта; K – Коэффициент фильтрации

Дамба р. Красной была сооружена в 1103 году и существует по настоящее время, высота дамбы постепенно увеличивалась в течение многих лет и в настоящее время, средняя высота составляет 20,0 м [136]. Крутизна внутреннего откоса дамбы $m = 1:3$, внешнего откоса – $m = 1:2$. Гребень и подошва дамбы также постепенно расширяются со временем реконструкции дамбы. В настоящее время ширина гребня дамбы составляет около 10,0 м, а ширина ее подошвы – около 110,0 м [136]. Детальная информация о дамбе показана на поперечном ее сечении (рис. 2.7).

В прошлом дамбы строились без геологических исследований, которые произвели только недавно и лишь на важнейших участках. Как оказалось, геологическое строение чрезвычайно разнообразно и изменчиво в пространстве и времени из-за постоянного меандрирования русла р. Красной. Геологическое строение основания дамбы изменчиво, а конструкция сооружения практически одинакова на всем протяжении и относится гибким, что не исключает появления деформаций вследствие развития природных и антропогенных процессов.

2.9. Закономерности пространственной изменчивости состава и свойств грунтов в сфере взаимодействия дамбы

2.9.1. Основные теоретические положения

В инженерной геологии геологическое строение используется для оценки работоспособности основания сооружений в период строительства и эксплуатации. Инженерно-геологические условия эксплуатации дамбы изменяются в течение года в связи с колебаниями уровня воды в реке в зависимости от сезона. Районирование области расположения дамбы производят с учетом влияния геологического строения на развитие процессов для выявления опасных в той или иной мере и безопасных для эксплуатации участков.

В 2002 году вьетнамский инженер-геолог То Цуан Ву [132] обосновал классификацию строения основания по фильтрационным свойствам

дисперсного грунта в основании дамбы. Чтобы оценить явление фильтрационного процесса под основанием дамбы на ее неустойчивость, нужно рассматривать следующие факторы:

- + пространственная структура грунтов основания дамбы;
- + физико-механические свойства грунтов основания дамбы.

Если в основании дамбы присутствуют мелкозернистые пески свиты Тхайбинь, может возникнуть фильтрационный процесс в основании, что вызовет неустойчивость дамбы. Если в основании дамбы присутствуют слабые глины, суглинки, супеси свиты Тхайбинь или Хайхынг, то может возникнуть процесс уплотнения грунтов под статической нагрузкой, что приведет к неравномерной осадке тела дамбы и появлению трещин в нем.

Для разделения области расположения дамбы на участки, для которых характерны определенные типы деформаций, необходимо учитывать следующие условия:

- + Наличие или отсутствие мелкозернистых песков озерно-аллювиальной свиты Тхайбинь, обеспечивающих фильтрацию.
- + Область распространения, мощность, физико-механические свойства слабых грунтов (глины, суглинки, супеси) свиты Тхайбинь или Хайхынг, которые могут вызвать деформацию основания (неравномерная осадка).
- + Область распространения, мощность, физико-механические свойства водоупорного горизонта, залегающего над мелкозернистыми песками.

2.9.2. Типизация инженерно-геологических разрезов

Анализ характеристик инженерно-геологических условий вдоль сооружения и статистика проявлений опасных геологических процессов в основании дамбы р. Красной указывает на их связь озерно-аллювиальных мелкозернистых песчаных отложений и слабых глин свиты Тхайбинь и Хайхынг. Эти грунты влияют на устойчивость дамбы. Кроме этого, существенно влияют на нее: меандрирование, пойменный рельеф и уровень воды в реке, особенно, когда уровень реки повышается (сезон паводков) и

быстро отступает. Физическо-механические свойства грунтов вдоль берегов реки и в основании дамбы в этот период могут быть существенно изменены.

Геологическое строение основания дамбы р. Красной в районе Ханоя является неоднородным и сложным, поэтому тут могут возникать и протекать различные виды геодинамических процессов, влияющие на устойчивость дамбы.

Оценка инженерно-геологических условий вдоль дамбы р. Красной показывает, что наличие слабых глинистых грунтов свиты Тхайбинь и Хайхынг или песка свиты Тхайбинь в основании, может способствовать возникновению опасных инженерно-геологических процессов. Если в основании дамбы присутствуют мелкозернистые пески свиты Тайбинь (слои 5, 10, 11), может возникнуть фильтрационный процесс в основании, что вызовет неустойчивость дамбы. Если в основании дамбы присутствуют слабые глины, суглинки, супеси свиты Тхайбинь (слои 8, 9) или Хайхынг (слой 13), может возникнуть неравномерная осадка и деформация тела дамбы. Однако, на некоторых участках основания дамбы р. Красной, песок или слабый грунт располагаются ниже водоупорной (слои 6, 7) свиты Тхайбинь, тогда устойчивость дамбы непосредственно зависит от мощности глины.

В соответствии с анализом инженерно-геологических условий вдоль дамбы р. Красной (левый и правый берега) геологическое строение основания дамбы делится на 4 класса и 8 типов следующим образом:

а) Первый класс (I) характеризуется наличием мелкозернистых песков (слои 5, 10 и 11) свиты Тхайбинь. Они расположены в приповерхностных слоях основания (на небольшой глубине). Потеря устойчивости дамбы напрямую зависит от фильтрационного процесса, возникающего и протекающего из-за хорошей водопроницаемости грунтов этого класса и высокого градиента напора в сезон паводков.

+ Первый тип I-1 характеризуется наличием мелкозернистых песков (слой 5) свиты Тхайбинь, его мощность от 5 до 10 м. Ниже – полутведый грунт (слой 7) мощностью 3,0 м и слабый грунт (слой 8) мощностью 5,0 м свиты

Тхайбинь, еще ниже залегает последний слой – полутвердая глина (слой 14) свиты Виньфук мощностью 10,0 м (рис. 2.8).

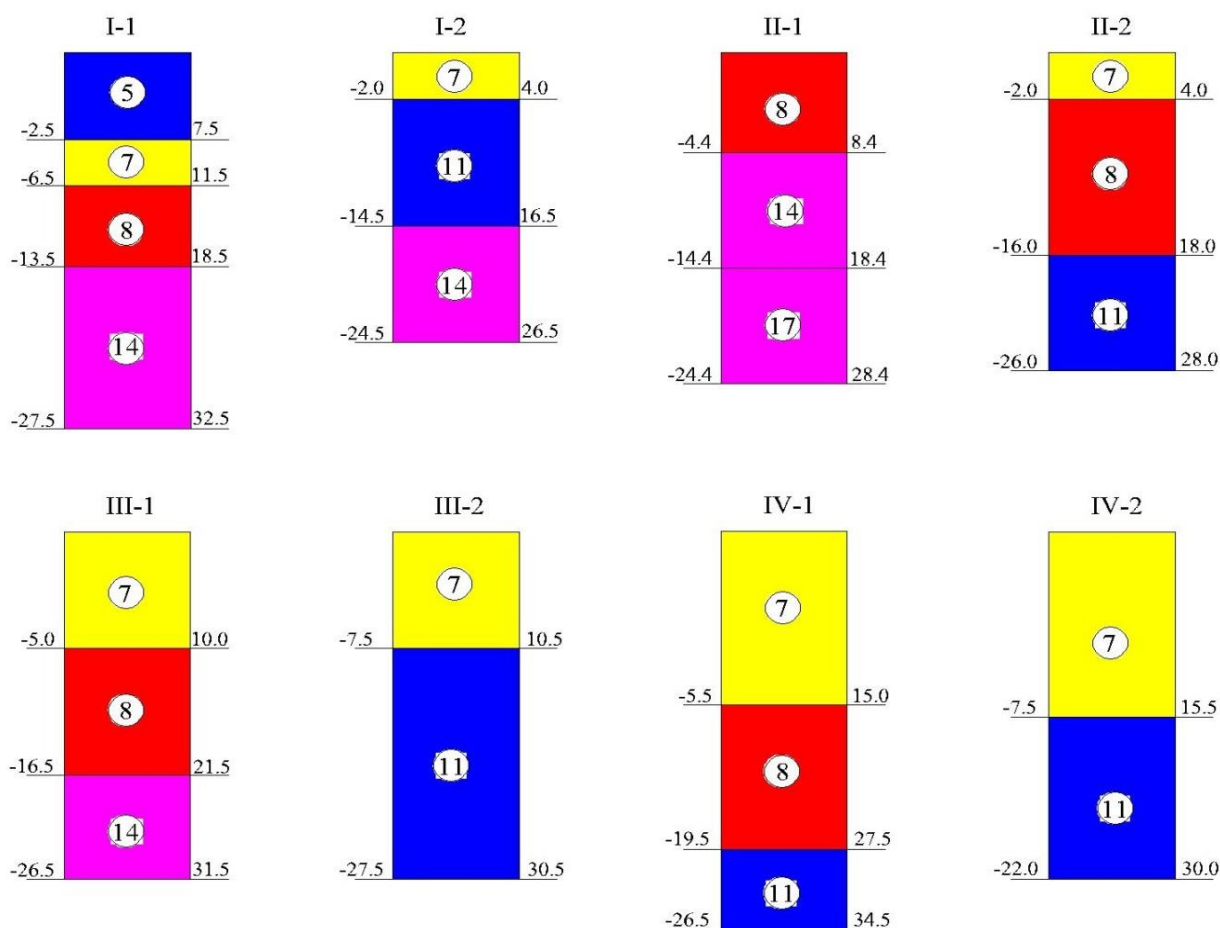
+ **Второй тип I-2** характеризуется наличием мелкозернистых песков (слои 5, 10 и 11) свиты Тхайбинь. Они расположены ниже полутвердого грунта (слой 7) свиты Тхайбинь (с мощностью менее 5,0 м) и имеют мощность от 5,0 до 10,0 м. Последний слой – полутвердая глина (слой 14) свиты Виньфук мощностью 10,0 м (рис. 2.8).

б) Второй класс (II) характеризуется наличием слабых глинистых грунтов (слои 4, 8 и 9) свиты Тхайбинь или (слои 12 и 13) свиты Хайхынг, а также текучепластичной глины свиты Виньфук. Они расположены в приповерхностной зоне (на небольшой глубине). Это слабые грунты, вызывающие неравномерную осадку основания, из-за которых возникает деформация поверхности и тела дамбы.

+ **Третий тип II-1** характеризуются наличием слабых грунтов (слой 8) свиты Тхайбинь. Он расположен на поверхности земли мощностью от 5,0 до 10,0 м. Ниже залегает полутвердая глина (слой 14) свиты Виньфук мощностью 10,0 м, и, наконец, последний слой этой зоны – песок (слой 17) свиты Виньфук мощностью 10,0 м (рис. 2.8).

+ **Четвертый тип II-2** характеризуется наличием слабых грунтов (слой 8) свиты Тхайбинь. Они расположены в приповерхностной зоне мощностью от 5,0 до 15,0 м. Ниже залегает полутвердая глина (слой 7) свиты Тхайбинь мощностью 4,0 м, и, наконец, последний слой этой зоны – песок (слой 11) свиты Тхайбинь мощностью 10,0 м (рис. 2.8).

в) Третий класс (III) характеризуется наличием глинистого или суглинистого слоев свиты Тхайбинь (слои 6 и 7) или (слой 14) свиты Виньфук, с твердой, полутвердой консистенцией и мощностью от 5,0 до 10,0 м. Ниже залегают слабая глина или песок свиты Тхайбинь. В этом случае фильтрационные и деформационные процессы в основании дамбы происходят медленно.



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 2.8. Характерные типы геологических разрезов вдоль дамбы Красной реки

+ **Пятый тип III-1** характеризуется наличием глинистого или суглинистого слоев свиты Тхайбинь (слои 6 и 7) или (слой 14) свиты Виньфук с твердой, полутвердой консистенцией и мощностью 10,0 м. Ниже залегает слабая глина свиты Тхайбинь мощностью 10,5 м и наконец, последний слой этой зоны – глина (слой 14) свиты Виньфук мощностью 10,0 м (рис. 2.8).

+ **Шестой тип III-2** характеризуется наличием глинистого или суглинистого слоев свиты Тхайбинь (слои 6 и 7) или (слой 14) свиты Виньфук с твердой, полутвердой консистенцией и мощностью 10,0 м. Ниже залегает песок (слой 11) свиты Тхайбинь мощностью 20,5 м (рис. 2.8).

г) **Четвертый класс (IV)** характеризуется наличием глинистого и суглинистого слоев с твердой, полутвердой, пластичной консистенцией большой мощности (более 10 м). В этом случае фильтрационный процесс, а, следовательно, деформация основания дамбы не влияют на ее устойчивость. Дамба гарантированно будет устойчива, так как вдоль нее на подобных участках не происходит никаких опасных инженерно-геологических процессов.

+ **Седьмой тип IV-1** характеризуется наличием глинистого или суглинистого слоев свиты Тхайбинь (слои 6 и 7) или (слой 14) свиты Виньфук с твердой, полутвердой консистенцией и большой мощностью (более 10 м). Ниже залегает слабая глина свиты Тхайбинь мощностью 12,5 м и наконец, последний слой этой зоны – глина (слой 11) свиты Тхайбинь мощностью 7,0 м (рис. 2.8).

+ **Восьмой тип IV-2** характеризуется наличием глинистого или суглинистого слоев свиты Тхайбинь (слои 6 и 7) или (слой 14) свиты Виньфук с твердой, полутвердой консистенцией и большой мощностью (более 10 м). Ниже залегает песок (слой 11) свиты Тхайбинь мощностью 14,5 м (рис. 2.8).

Исходя из вышесказанного, геологическое строение основания дамбы р. Красной в Ханое делится на 8 типов, объединенных в 4 класса, причем характер и интенсивность возникающих опасных инженерно-геологических процессов в каждом из них сильно различен. В сочетании со статистическими данными, собранными за годы наблюдения за Ханойской дамбой, ежегодными данными по ее управлению, результаты представлены в таблице 2.11.

Таблица 2.11.

Типизация геологического строения основания дамбы на берегах р. Красной в Ханое

Класса	Тип	Характеристика	Интервалы	
			На правом берегу	На левом берегу
I	I-1	Дамба расположена непосредственно на мелкозернистых песках	15,5–17,3 км; 20,5–24,9 км; 25,4–30,7 км	30,0–39,5 км; 40,5–42,5 км
	I-2	Дамба расположена на глинистых или суглинистых грунтах твердой или полутвердой консистенции (мощностью менее 5 м), ниже них залегает песок	48,2–49,2 км; 65,3–66,7 км; 92,5–96,6 км; 97,7–100,8 км; 105,7–107,1 км	55,0–68,5 км; 78,0–80,3 км; 81,5–83,8 км; 87,0–90,0 км
II	II-1	Дамба расположена непосредственно на слабых грунтах (глина и суглинок текучей, текучепластичной консистенции)	3,5–5,0 км; 35,0–42,0 км; 56,7–58,0 км; 68,3–69,7 км; 78,4–79,0 км; 111,1–114,2 км; 117,5–120,0 км	42,5–5,0 км
	II-2	Дамба расположена на глинистых или суглинистых грунтах твердой или полутвердой консистенции (мощностью менее 5 м), ниже залегает слабый грунт	10,0–12,8 км; 13,5–15,5 км; 43,4–45,0 км; 64,2–65,3 км; 66,7–68,3 км; 71,0–74,8 км; 75,4–78,0 км; 79,4–80,0 км; 90,5–92,5 км; 96,6–97,7 км; 103,3–105,7 км; 107,1–109,1 км; 114,2–117,5 км	39,5–40,5 км; 75,8–77,4 км
III	III-1	Дамба расположена непосредственно на глинистых или суглинистых грунтах твердой или полутвердой консистенции. (мощностью от 5,0 м до 10,0 м), ниже залегает песок.	1,5–3,5 км; 12,8–13,5 км; 17,3–19,0 км; 45,0–48,2 км; 50,0–56,7 км; 74,8–5,4 км; 87,5–90,5 км; 109,1–111,1 км	45,8–51,3 км; 72,3–73,1 км; 80,3–81,5 км; 83,8–85,8 км
	III-2	Дамба расположена непосредственно на глинистых или суглинистых грунтах твердой или полутвердой консистенции (мощностью от 5,0 м до 10,0 м), ниже залегает слабый грунт	8,8–10,0 км; 19,0–20,5 км; 24,9–25,4 км; 58,8–64,2 км; 70,3–71,0 км; 100,8–103,3 км	77,4–78,0 км
IV	IV-1	Дамба расположена непосредственно на глинистых или суглинистых грунтах твердой или полутвердой консистенции (мощностью более 10,0 м), ниже залегает песок	0,0 – 1,5 км; 5,0 – 8,8 км; 42,0 – 43,4 км; 49,2 – 50,0 км; 80,0 – 87,5 км	45,0–45,8 км; 51,3–55,0 км; 68,5–72,3 км; 73,1–75,8 км
	IV-2	Дамба расположена непосредственно на глинистых или суглинистых грунтах твердой или полутвердой консистенции (мощностью более 10,0 м), ниже залегает слабый грунт	30,7–35,0 км; 58,0–58,8 км; 69,7–70,3 км	85,8–87,0 км

Выводы

Инженерно-геологические условия на территории Ханоя обладают рядом важных особенностей, которые в совокупности определяют сложность эксплуатации системы защитных дамб.

1. Климат в районе исследований тропический с явно выраженным сезоном дождей (с мая по сентябрь), когда выпадает до 65–70% годового количества осадков.

2. Город Ханой расположен в дельтовой части очень крупной р. Красной, принимающей в его черте полноводные притоки Да, Дуонг и Ло. В сезон дождей на реке возникает паводок высотой до 18–19 м.

3. При очень низменном, плоском рельефе 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.

4. Геологическое строение побережий р. Красной в Ханое, на которых расположены защитные дамбы, очень сложное из-за присутствия в верхних частях разреза изменяющихся по мощности песчаных и слабых глинистых грунтов свиты Тхайбинь и Хайхынг.

5. Их наличие в геологическом строении является основной причиной развития экзогенных и инженерно-геологических процессов (пывуны, 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.

6. Автору удалось разделить геологическое строение сферы взаимодействия дамбы на 4 класса и входящие в них 8 типов, и охарактеризовать их по возможности протекания инженерно-геологических процессов, влияющие на устойчивость дамбы и берегов реки.

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

3.1. Выбор метода и программы для моделирования фильтрационного процесса

Теория движения жидкостей (воды, нефти и т. д.) в грунте, трещинах или пористых средах называется теорией фильтрационного процесса. Исследование движения жидкостей в среде горных пород играет важную роль на практике. Особенно при изучении вопросов устойчивости гидротехнических сооружений, фильтрационная теория играет важную роль, такую как определение характеристик фильтрации через земляную плотину, фильтрации в основании и бортах сооружения, фильтрации через тело дамбы и т. д.

При проектировании гидротехнических сооружений необходимо рассчитать и определить характеристики фильтрационного потока, такие как фильтрационное давление, фильтрационный расход, градиент фильтрационного потока и т. д., что также является решением фильтрационных проблем, когда можно оценить устойчивость и долговечность сооружения.

Решение проблемы инфильтрации возможно следующим образом:

- Определение фильтрационного расхода через тело и основание дамбы.

На основе этого предложить соответствующие профилактические меры.

- Определение местоположения линии насыщения в теле дамбы, из чего нужно будет найти фильтрационное давление, которое используется в расчете устойчивости откоса дамбы.

- Определение градиента фильтрационного потока в теле и основании дамбы. Из этих значений, можно оценить и спрогнозировать процесс суффозии и плывуны, возникающие в основании дамбы.

В фильтрационных расчетах метод конечных элементов позволяет решать задачи со сложными фильтрационными параметрами и граничными

условиями. Этот метод показал относительно точные результаты, близкие к действительности.

В настоящее время многие компьютерные программы используют метод конечных элементов для расчета фильтрации. В этом исследовании, при решении задач фильтрации автор использовал модуль SEEP/W (из программного комплекса GEO-STUDIO) [42, 82].

Программа SEEP/W используется для моделирования движения подземных вод и распределения давления поровой воды в грунтах. Она может анализировать проблемы фильтрации, такие как: фильтрационный безнапорный поток, фильтрационный напорный поток, инфильтрацию дождевой воды, стабильный фильтрационный поток, нестабильный фильтрационный поток в насыщенных и ненасыщенных грунтах и т. д. Кроме того, комбинация SEEP/W и SLOP/W используется для анализа устойчивости склона в условиях сложного порового давления воды [82]. Схема решения задачи фильтрации показана на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1. Схема решения задачи фильтрации

3.2. Выбор метода и программы для оценки устойчивости откоса дамбы и берегов р. Красная

При расчете устойчивости откосов дамбы и берегов р. Красная был использован метод предельного равновесия Morgenштерна и Прайса (1965) [93]. 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).

На рис. 3.2 показана система сил, действующая на произвольный отсек призмы обрушения, учитываемая в методе Morgenштерна и Прайса.

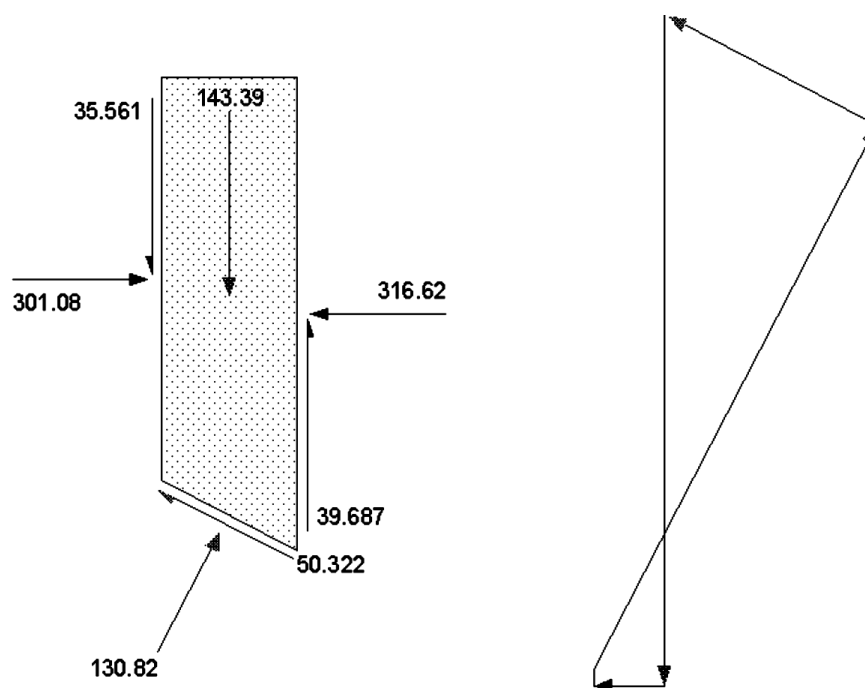


Рисунок 3.2. Многоугольник сил в методе Morgenштерна и Прайса [81]

Равновесие в отсеке обеспечивается приравниванием к нулю моментов сил относительно подошвы отсека и приравниванием к нулю суммы проекций сил на направления нормали и касательной к подошве отсека.

Уравнения коэффициента устойчивости по Morgenштерну и Прайсу в отношении равновесия моментов и равновесия горизонтальных сил имеют следующий вид:

в отношении моментов:

$$K_y(m) = \frac{\sum \{c' \times \beta \times R + (N - u \times \beta) \times R \times \tan \varphi'\}}{\sum N \times \sin \alpha - \sum N \times f + \sum D \times d} \quad (3.1)$$

в отношении горизонтальных сил:

$$K_y(f) = \frac{\Sigma\{c' \times \beta \times \cos \alpha + (N - u \times \beta) \times \operatorname{tg} \varphi' \times \cos \alpha\}}{\Sigma N \times \sin \alpha - \Sigma D \times \cos \omega} \quad (3.2),$$

где c' – эффективное сцепление; φ' – эффективный угол внутреннего трения; u – поровое давление; N – перпендикулярная сила, действующая в основании отсека; W – вес среза; D – нагрузка; $\beta, R, x, f, d, \omega$ – геометрические параметры; α – уклон основания отсека по отношению к горизонтали;

В результате получается система уравнений, для решения которой в методе Моргенштерна и Прайса вводится упрощающее допущение, касающееся зависимости между касательными E и нормальными N составляющими сил взаимодействия между отсеками:

$$X = E \lambda f(x) \quad (3.3)$$

где, E – касательная составляющая сил взаимодействия между отсеками; X – нормальные составляющие сил взаимодействия между отсеками; $f(x)$ – вид функциональной зависимости между E и X ; λ – доля используемой функции

В методе Моргенштерна и Прайса функциональная зависимость между E и X может быть различной. Её использование делает задачу расчета устойчивости статически определенной.

Расчет по этому методу дает относительно точные результаты и близок к реальности.

В настоящее время многие компьютерные программы используют метод Моргенштерна и Прайса для расчета устойчивости откосов и склонов. В этом исследовании, при решении задач фильтрации автор использовал модуль SLOPE/W (из программного комплекса GEO-STUDIO) [39, 82]. Схема решения задачи устойчивости откоса показана на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3. Схема решения задачи скольжения

3.3. Выбор метода и программы для расчета осадки

Под воздействием нагрузки, грунтовое основание деформируется с течением времени [82]. Это вызывает деформацию или разрушение сооружения, стоящего на нем. В зависимости от геологического строения и типов грунта, залегающих под дамбой, скорость и величина их осадки может существенно различаться. Например, если в основании дамбы залегают слабые грунты (глины и суглинки мягко и текучепластичной консистенции или илы), осадка может быть очень значительной.

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. Численные методы позволяют моделировать поведение грунтовых массивов во

взаимодействии с сооружениями с учетом практически всех присущих грунтам особенностей [82].

В настоящее время многие компьютерные программы используют метод конечных элементов для расчета осадки. В этом исследовании, автор использовал модуль SIGMA/W (из программного комплекса GEO-STUDIO) [80] и программу RS 2 [98].

3.4. Условия и причины разрушения берегов р. Красной

Активизация оползневых процессов за счет подъема уровня воды в р. Красной проявляется различными способами, вызывая изменение напряженного состояния массива и физико-механических свойств грунтов, а также за счет развития фильтрационных деформаций, связанных с увеличением порового давления в грунтах и гидродинамического воздействия потока подземных вод [5, 27].

Речная эрозия является опасным геологическим процессом, который имеет разнообразные и сложные проявления и последствия [5]. На территории Ханоя этот процесс создает потенциальную опасность для жителей прибрежных территорий [2]. Поэтому выявление причин эрозии является важным практическим вопросом для стабильного развития этих районов города.

Проанализируем основные компоненты инженерно-геологических условий, влияющие на формирование парагенезиса процессов в береговой зоне системы р. Красной в черте Ханоя. К ним относятся: климатический фактор, динамика русел системы р. Красной и ее притоков, режим речного потока, геологическое строение береговой зоны, антропогенные факторы (техногенное воздействие).

3.4.1. Влияние геологического строения на устойчивость берега реки

Берега р. Красной сложены аллювиальными отложениями с различным составом материала, временем формирования, физико-механическими свойствами, поэтому способность противостоять боковой эрозии реки у берегов также очень разные. Вдоль берегов р. Красной пойма имеет разную высоту рельефа. В частности, низкие поймы часто затопляются каждый год, когда случаются наводнения. Этот тип аллювиальных отложений наиболее легко разрушается под воздействием потока реки. Высокие поймы имеют более высокие абсолютные отметки, воздействие речного потока тут будет минимальным.

Оба берега реки сильно различаются геологическим строением и устойчивостью к речной эрозии. Связные грунты берегов реки обладают большей прочностью и устойчивостью к эрозии, чем несвязные. Прочность связных грунтов на берегах рек также очень различна, если слой имеет разнообразный состав (песок, супесь, суглинок, глина), то его устойчивость к эрозии очень низкая, в то время как слой, имеющий большую мощность и однородную структуру, более устойчив к эрозии. Устойчивость берега реки на каждом его участке зависит от прочности и мощности грунтов, которые составляют тот или иной участок берега.

Для уточнения приведенного выше рассуждения автор проводит исследование устойчивости берега реки на ПК 61,2 км правого берега р. Красной.

На рисунке 3.4 показан разрез, характерный для правобережья р. Красной. На нем видно, что чередование пород в целом таково, что вверх по разрезу фильтрационные свойства грунтов ухудшаются (коэффициент фильтрации падает). Так на глубинах от 0 до 26,0 м залегают глина или суглинок, далее (от 26,0 до 41,0 м) – песок или супесь и глубже 50,0 м – гравий.

Берега реки часто сложены супесью и песком, которые легко размываются водой [53]. Физико-механические свойства грунтов показаны в таблицах 2.8 и 2.9.

Физико-механические свойства грунтов характеризуются сильной изменчивостью [10, 12], с целью оценки влияния которой на устойчивость береговых склонов Красной реки был выполнен вероятностный анализ устойчивости [29] (рис. 3.5).

Анализ результатов расчета 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, слагающих слой 17 (рис. 3.6).

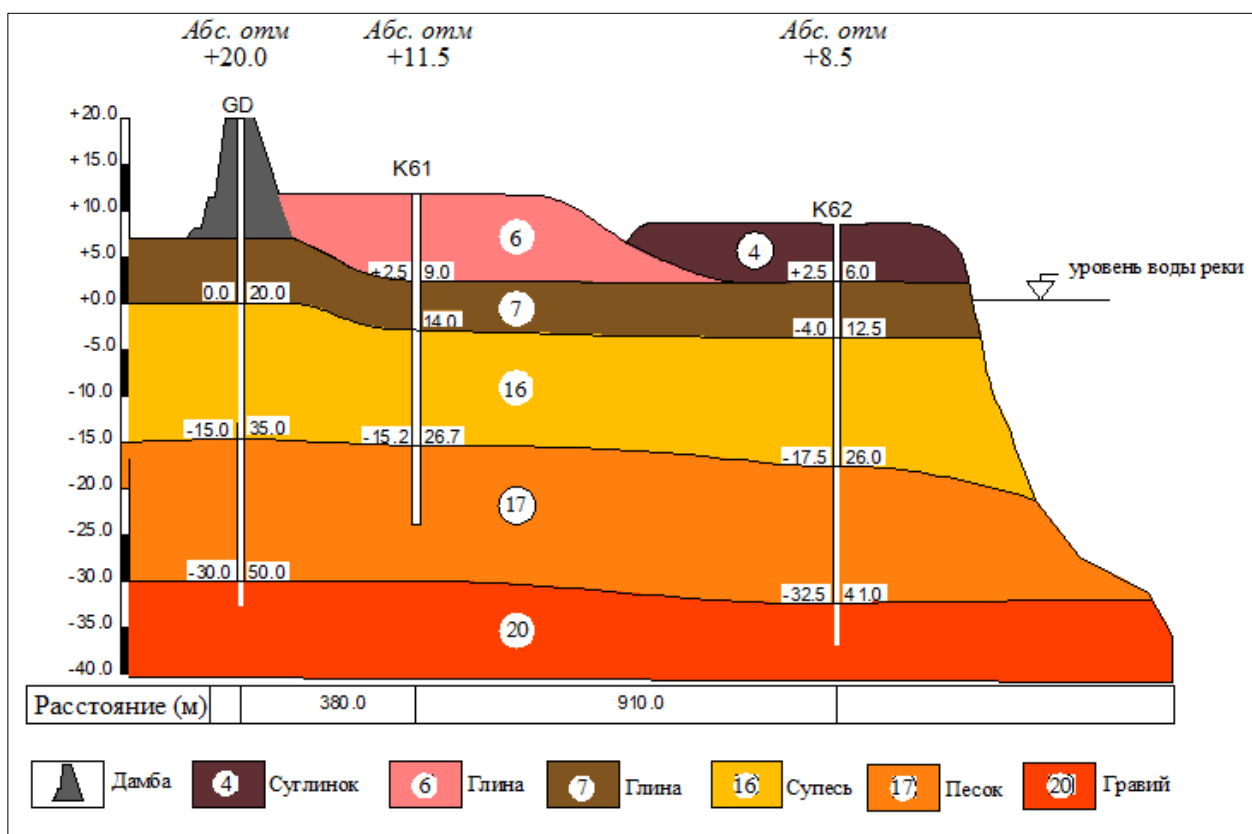


Рисунок 3.4. Инженерно-геологический разрез на участке правобережной дамбы (61,2 км)

3.4.2. Влияние гидрогеологического и гидрологического режима на устойчивость берега реки

Из-за характерной черты климата района исследования, особенностью которого является наличие двух сезонов с очень разным количеством атмосферных осадков, гидрогеологический и гидрологический режимы также сильно отличаются в различное время года.

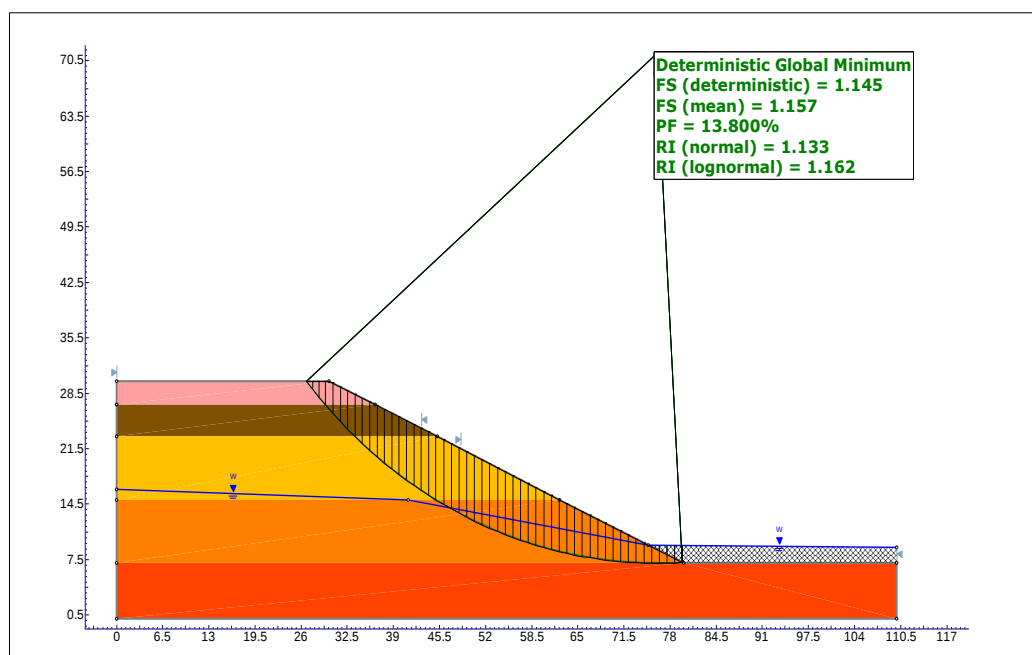


Рисунок 3.5. Вероятностный анализ устойчивости берега р. Красной



Рисунок 3.6. Зависимость K_u берега от угла внутреннего трения песков, составляющих 17 слой

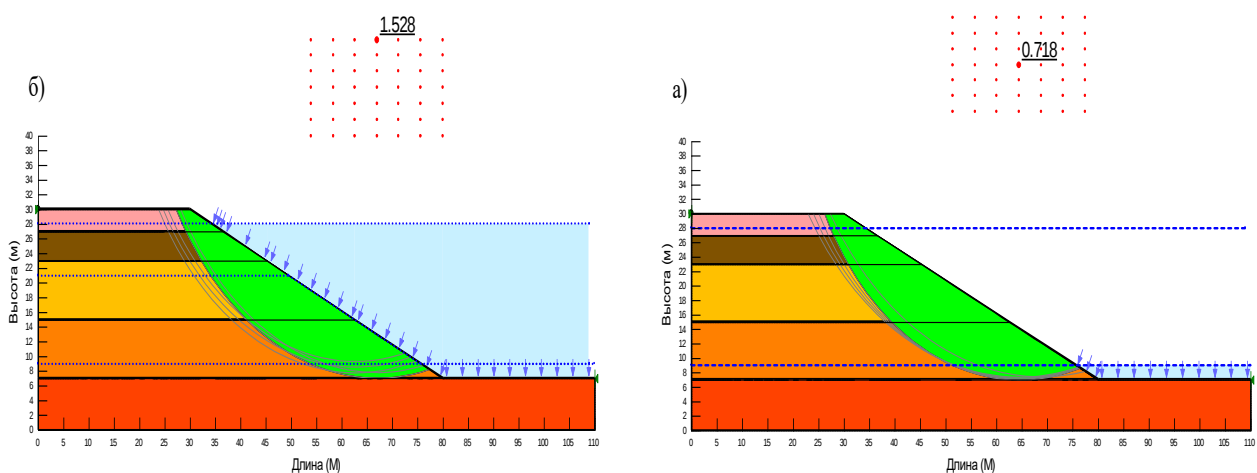
На эрозию и разрушение берега влияет динамика грунтовых и поверхностных вод во время паводков и засушливых сезонов. Двухсезонное распределение (дождливый и засушливый периоды) в области р. Красной привело к совершенно отличному двухсезонному режиму речного потока. Поток в сезон паводков имеет более высокую скорость, чем поток в сухой сезон ($v_{\text{паводка}} = 1,38 \text{ м/с} > v_{\text{межень}} = 0,66 \text{ м/с}$) [105, 122], поэтому поток в сезон паводков вызывает эрозию берега сильнее. Кроме того, атмосферные осадки в разные сезоны изменяют физико-механические свойства грунтов, скорость поверхностного и подземного потоков 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.

Эрозия берегов реки имеет разную природу в течение года [21, 103]. В период дождей это, в первую очередь, собственно эрозия, связанная с гидродинамическим воздействием поверхностных вод рек системы р. Красной. Амплитуда колебания уровня воды в р. Красной и р. Дуонг достигает 12 м и более [138]. Во время паводка расходы р. Красной достигают в среднем около 30–35 тыс. м³/с (с максимумом – 48 тыс. м³/с). Продолжительность пиковых паводков обычно составляет 15–20 дней. На пике паводка уровень реки поднимается до 15–20 м, скорость течения в 10–15 раз больше, чем в межень [43]. Вода в реке мутная, содержащая большое количество взвешенных частиц. Твердый сток реки достигает 9,6 кг/м³ воды. В пределах территории Ханоя русла рек извилистые, направление потока сильно изменяется, поэтому собственно размыв потоками воды в реках Красной и Доунг становится мощным фактором развития боковой эрозии [138] и связанного с ней разрушения берегов за счет оползневого процесса.

Активизация оползневых процессов за счет подъема уровня воды в р. Красной проявляется различными способами, вызывая изменение напряженного состояния массива и физико-механических свойств грунтов, а также за счет развития фильтрационных деформаций, связанных с

увеличением порового давления в грунтах и гидродинамического воздействия потока подземных вод [29].

Выполненное моделирование устойчивости берегов при разном положении уровня воды в реке в зависимости от сезона (рис. 3.7 а и б) показало, что за счет быстрой сработки уровня паводковых вод коэффициент устойчивости (K_y) берегового склона может упасть более чем в два раза (с $K_y = 1,528$ на момент наибольшего подъема уровня воды в реке до $K_y = 0,718$ на момент его максимального падения). В сухой сезон интенсивность и скорость эрозии берегов реки снижаются, изменяется причина потери устойчивости. Разрушение берегов проявляется как результат фильтрации (разгрузки) подземных вод и связанной с этим процессом суффозии грунтов, слагающих берег.



а) Коэффициент устойчивости при пиках наводнения

б) Коэффициент устойчивости после быстрого спада воды

Рисунок 3.7. Оценка устойчивости откоса берега реки при изменении уровня паводковых вод

3.5. Механизмы деформирования откосов дамбы за счет изменения гидрологических условий

В последние годы анализ инженерно-геологических процессов, развивающихся в пределах литотехнической системы (ЛТС) дамб р. Красной, приводящих к формированию деформаций тела дамбы и ее разрушению, приобрел особую актуальность [27].

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.

Действие подземных вод на состояние откосов дамбы проявляется различными путями, вызывая изменение напряженного состояния массива и физико-механических свойств горных пород, а также обуславливая развитие фильтрационных деформаций [13, 17, 26, 120].

Рассмотрим изменение гидрогеологических условий в теле дамбы, обусловленное двумя разнонаправленными гидрологическими процессами:

1. повышением уровня грунтовых вод в теле дамбы в период экстремальных паводков реки Красной;
2. быстрой сработкой уровня паводковых вод.

Воздействие данных процессов на устойчивость откосов дамбы проявляется по-разному. В первом случае падает устойчивость внутреннего откоса, во втором – внешнего откоса. На рисунке 3.8 приведен пример нарушения устойчивости откоса дамбы за счёт быстрой сработки уровня паводковых вод.



Рисунок 3.8. Нарушения устойчивости внешнего откоса дамбы за счёт быстрой сработки уровня паводковых вод (Фото Динь Т.Х.)

Для оценки влияния изменения гидрогеологических условий в теле дамбы на устойчивость её откосов, было выполнено математическое моделирование методом предельного равновесия (Моргенштерна-Прайса [19, 94]).

Моделирование выполнялось по двум сценариям:

1. оценка устойчивости откоса дамбы при повышении уровня грунтовых вод в период экстремального паводка;
2. оценка устойчивости откоса дамбы за счёт быстрой сработки уровня паводковых вод.

Оценка устойчивости внутреннего откоса дамбы при повышении уровня грунтовых вод в период экстремального паводка

Тело дамбы сформировано грунтами с низкими коэффициентами фильтрации. Как указывалось в работе [120] при увеличении коэффициента фильтрации (K_f) слабопроницаемых грунтов, коэффициент устойчивости (K_y) так же возрастает, что вполне логично, т.к. уменьшение K_f ухудшает дренируемость грунтов и, как следствие, увеличивает в грунтах поровое давление. Таким образом, при повышении уровня подземных вод в теле дамбы именно изменение порового давления будет оказывать определяющее влияние на изменение K_y откоса дамбы.

Для оценки влияния данного сценария на устойчивость откосов дамбы моделирование было выполнено по трём схемам:

1. оценка устойчивости внутреннего откоса дамбы без учёта влияния подземных вод;
2. оценка устойчивости внутреннего откоса дамбы при повышении уровня грунтовых вод на начальный период экстремального паводка (УГВ 1);
3. оценка устойчивости внутреннего откоса дамбы при повышении уровня грунтовых вод на конечный период экстремального паводка (УГВ 2).

На рисунке 3.9 представлены соответствующие геомеханические схемы с результатами расчётов устойчивости внутреннего откоса дамбы.

Результаты расчёта показывают, что при повышении уровня грунтовых вод в теле дамбы в процессе паводка, K_y внутреннего откоса снижается от 1,14 до 0,89 (откос дамбы теряет устойчивость) [13].

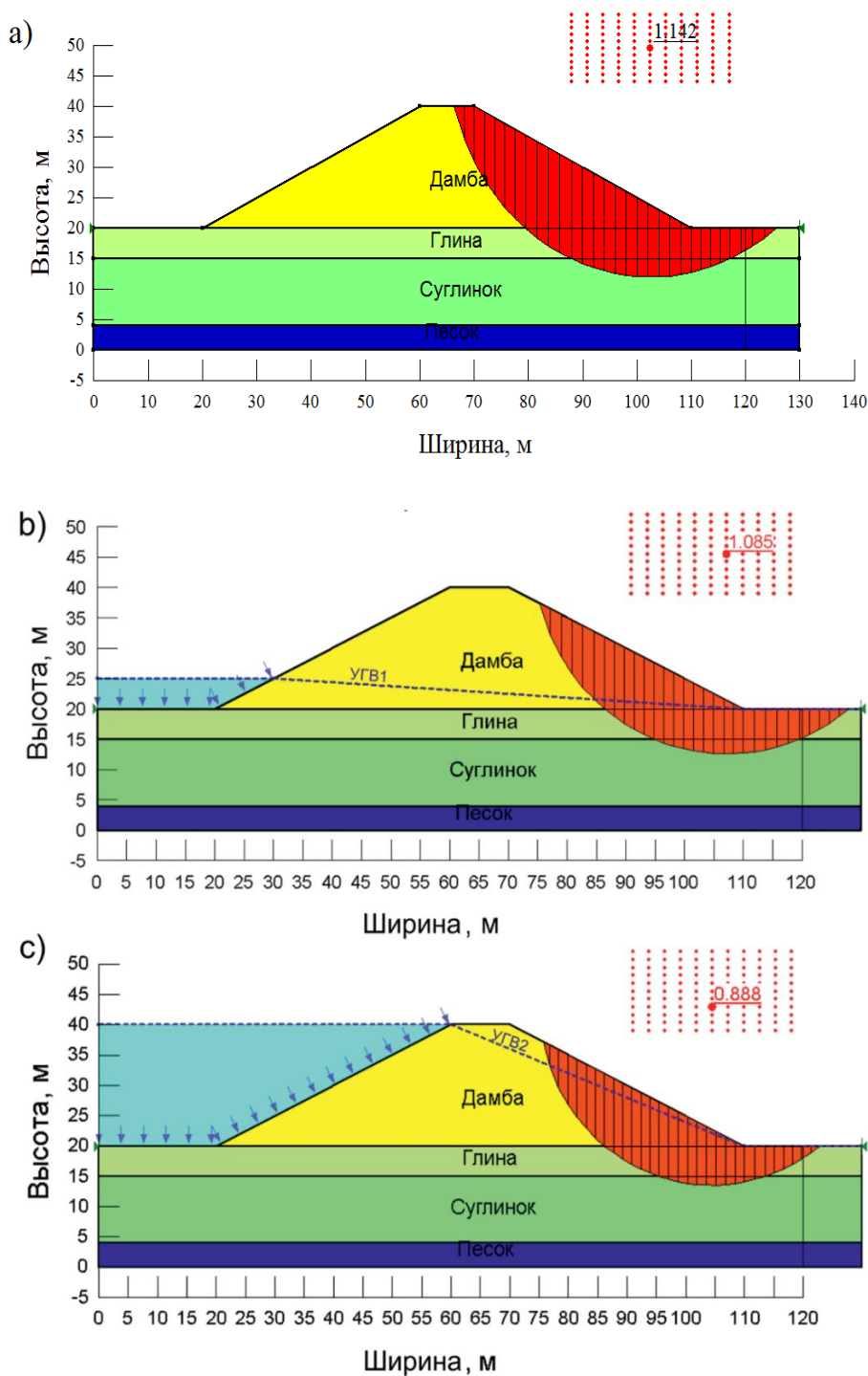


Рисунок 3.9. Оценка устойчивости внутреннего откоса дамбы при повышении уровня грунтовых вод в период экстремального паводка: А) Оценка устойчивости откоса дамбы без учета влияния подземных вод, K_y – 1.14; Б) Оценка устойчивости откоса дамбы при повышении уровня грунтовых вод на начальный период экстремального паводка (УГВ 1), K_y – 1.085; В) Оценка устойчивости откоса дамбы при повышении уровня грунтовых вод на конечный период экстремального паводка (УГВ 2), K_y – 0.89

Оценка устойчивости внешнего откоса дамбы за счёт быстрой сработки уровня паводковых вод

Важным моментом при оценке устойчивости насыпных дамб является расчёт во время быстрого падения уровня воды [68, 81, 92]. Недоучёт влияния данного процесса на устойчивость дамб может привести к тяжелым последствиям. Наиболее ярким примером является разрушение Pilarcitos Dam в ноябре 1969 года из-за быстрого понижения уровня воды [31].

Снижение K_y внешнего откоса дамбы при понижении уровня паводковых вод обусловлено двумя причинами. Первая – это снятие стабилизирующего действие воды на внешний откос.

Для оценки влияния данного эффекта на устойчивость внешних откосов дамбы моделирование было выполнено по двум схемам:

1. оценка устойчивости откоса дамбы, обращенного к реке, при повышении уровня грунтовых вод на конечный период экстремального паводка (УГВ 2);
2. оценка устойчивости откоса дамбы, обращенного к реке, при понижении уровня грунтовых вод до УГВ 1.

На рисунке 3.10 представлены соответствующие геомеханические схемы с результатами расчётов устойчивости откоса дамбы.

Результаты расчёта показывают, 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 при быстрой сработке уровня воды является то, что в слабодренлируемых грунтах тела дамбы возникает избыточное поровое давление. Таким образом, удерживающие силы будут определяться недренлируемой прочностью грунтов на сдвиг.

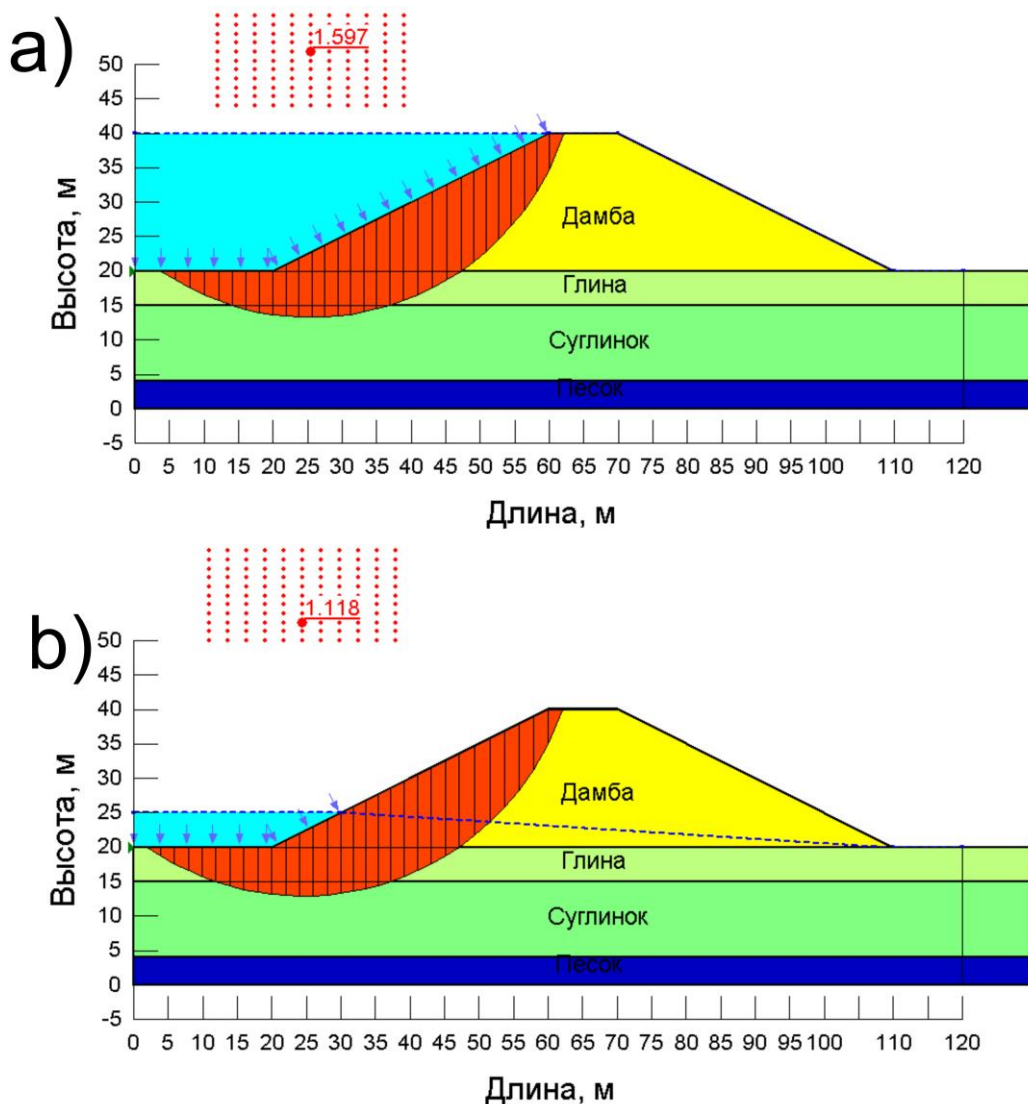


Рисунок 3.10. Оценка устойчивости внешнего откоса дамбы за счёт снятия удерживающих сил, которые вода оказывает на откос: А) оценка устойчивости откоса, при уровне грунтовых вод на конечный период экстремального паводка (УГВ 2), $K_y - 1.6$; Б) оценка устойчивости откоса, при понижении уровня грунтовых вод до УГВ 1, $K_y - 1.12$.

Для совместного учёта влияния обоих описанных выше 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 [71].

Этот метод коротко можно описать следующим образом [31, 32].

Первый этап включает в себя анализ устойчивости дамбы до начала снижения уровня воды, когда давление поровых вод в грунтах остается стабильным. В качестве расчётной используется эффективная прочность

грунтов с учётом действующей величины порового давления. Цель вычислений первого этапа состоит в том, чтобы оценить напряжения (эффективное нормальное напряжение и сдвигающее напряжение), действующие вдоль поверхности скольжения до начала снижения уровня воды.

Второй этап включает в себя анализ устойчивости дамбы после быстрой сработки уровня воды, когда давление поровых вод в грунтах определяется пьезометрической линией после быстрого спада порового давления. В качестве расчётной используется недренированная прочность грунтов, слагающих насыпь. Прочность на сдвиг при недренированном состоянии оценивается для второго этапа с использованием напряжений, рассчитанных на первом этапе. Дополнительные расчёты для третьей стадии выполняются для проверки того, может ли прочность на сдвиг в дренированном состоянии быть ниже прочности в недренируемом состоянии. Затем сравнивают значения дренируемой и недренированной прочности грунтов вдоль плоскости скольжения. Для третьего этапа выбирают наименьший результат.

На третьем этапе выполняется анализ устойчивости с использованием расчётных значений прочности на сдвиг, полученной на втором этапе и конечного уровня воды после его падения. Устойчивость дамбы после быстрой сработки уровня воды, определяется расчётом, полученном на третьем этапе.

На рисунке 3.11 представлены соответствующие геомеханические схемы с результатами расчётов устойчивости откоса дамбы.

Результаты расчёта показывают, что при резком снижении уровня грунтовых вод в теле дамбы от УГВ 2 до УГВ 1, K_y откоса, падающего в сторону «реки», снижается от 1,6 до 1,05. Сравнение полученного результата с расчётом, приведенным на рис. 3.4, позволяет оценить вклад избыточного порового давления в снижение K_y откоса дамбы (за счёт избыточного порового давления K_y уменьшился на 0,07 ед.). При полной сработке уровня воды

коэффициент устойчивости становится меньше единицы ($K_y = 0,92$), т.е. внешний откос дамбы теряет устойчивость.

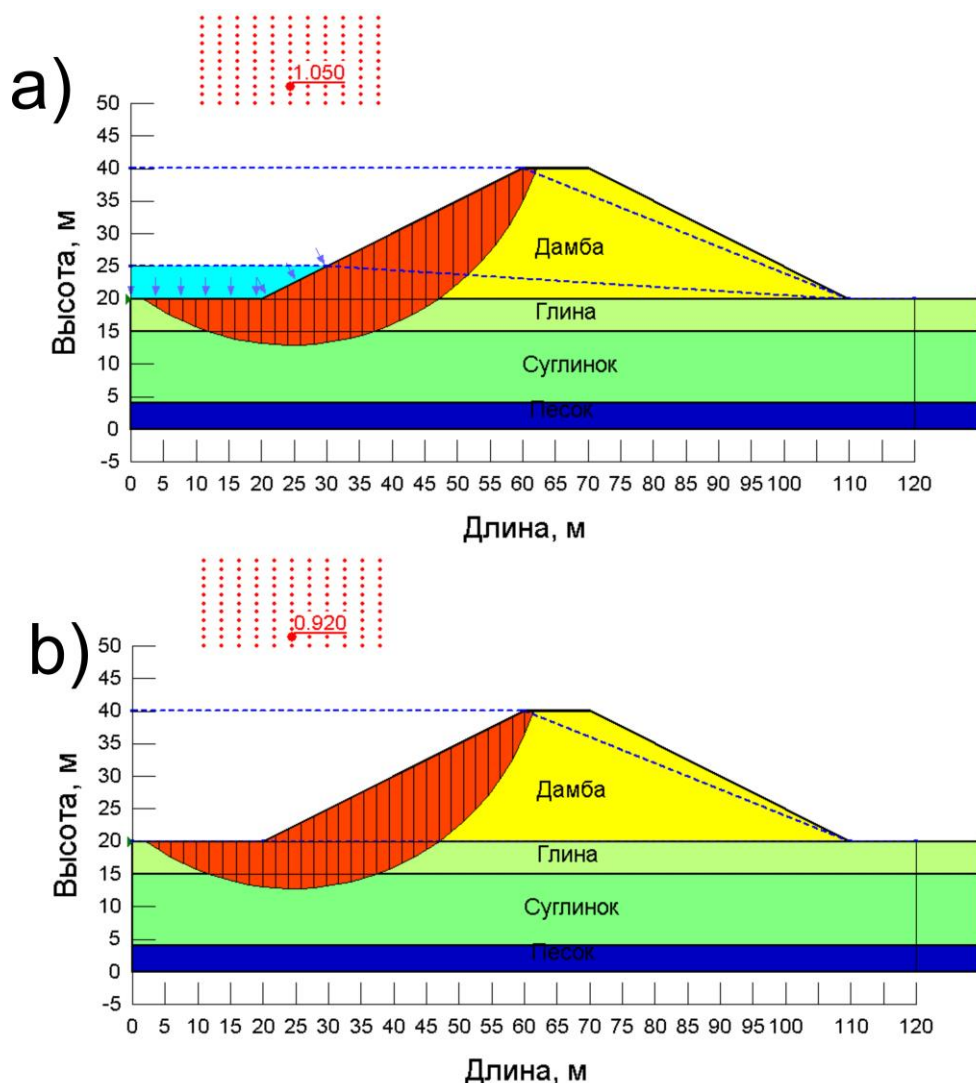


Рисунок 3.11. Геомеханические схемы с результатами расчётов устойчивости внешнего откоса дамбы в результате сработки паводкового уровня реки Красной: А) оценка устойчивости откоса дамбы при сработке уровня грунтовых вод с УГВ 2 до УГВ 1, $K_y = 1.05$; Б) оценка устойчивости откоса дамбы, при полной сработке уровня, $K_y = 0.92$

Выполненное математическое моделирование устойчивости откосов дамбы за счёт изменения гидрогеологических условий позволило определить механизмы деформирования её откосов. В результате расчетов получено, что при повышении уровня грунтовых вод в теле дамбы в процессе паводка K_y внутреннего откоса снижается от 1,14 до 0,89 (откос дамбы теряет устойчивость). Аналогичный результат получен при учете полной сработки уровня паводковых вод – коэффициент устойчивости внешнего откоса

становится меньше единицы ($K_y = 0,92$), т.е. откос дамбы так же теряет устойчивость.

Таким образом, в период экстремального подъёма воды в реке Красная вероятно деформирование внутренних откосов дамбы, в момент спада – внешних. Этот факт необходимо учитывать при разработке мероприятий по укреплению откосов существующих дамб, а также при проектировании новой системы дамб города Ханоя.

3.6. Оценка влияния фильтрационных процессов в деформировании дамбы

Фильтрационные деформации в грунтовых дамбах могут образовываться как медленно, так и чрезвычайно стремительно. Механизм разрушения земляной дамбы тесно связан с подъемом воды, вследствие чего повышаются градиенты напора фильтрационного потока. На рис. 3.12 приведены принципиальные схемы разрушения основания дамбы под влиянием фильтрационного процесса [129].

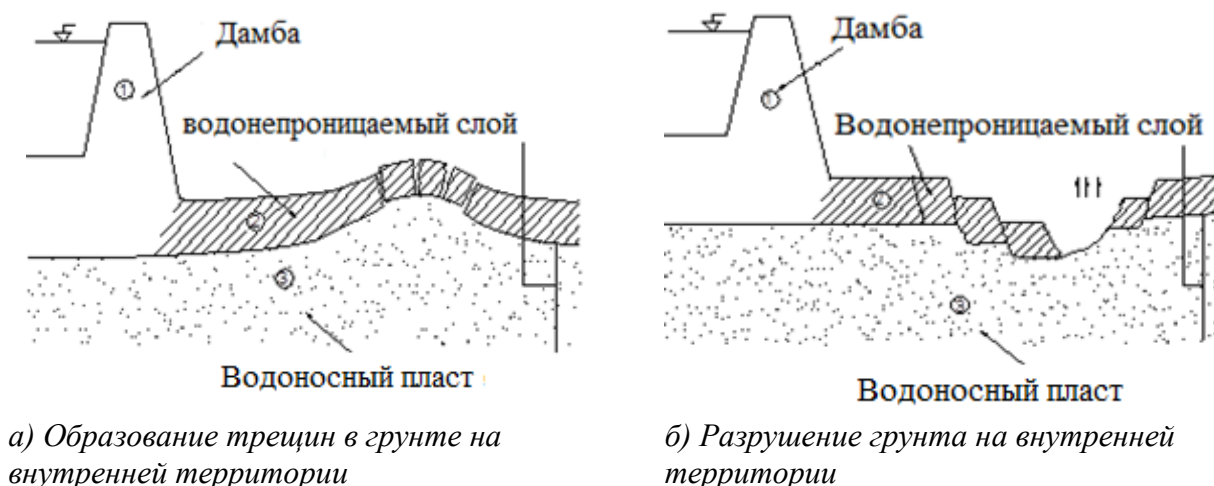


Рисунок 3.12. Разрушение грунта на внутренней территории под влиянием фильтрационного процесса

Гидродинамическое давление будет увеличиваться в зависимости от времени затопления. В случае длительного паводка фильтрационное давление в грунтах основания дамбы может быть достаточно большим, и тогда

устойчивость дамбы определяется геологическим строением ее основания.

В данном исследовании проведена оценка устойчивости откосов дамбы для инженерно-геологических подтипов I-2, III-2, IV-2 (рис. 2.8).

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 [29].

При фильтрационном моделировании земляных дамб ввиду сложности учета всех факторов, влияющих на движение фильтрационного потока, в расчетах были сделаны следующие допущения и приняты следующие условия:

- грунт тела дамбы канала принимается однородным и изотропным, т.е. когда значение коэффициента фильтрации во всех направлениях является постоянным;

- высота верхнего уровня воды (уровень реки в период паводка): +18,0 м;

- высота уровня воды за дамбой: +0,0 м;

- время паводка: 20 дней.

Задача решалась в плоской постановке, при этом моделирование изменения градиента напора во времени после подъема уровня в реке до максимальной отметки было выполнено методом конечных элементов [82], а оценка устойчивости дамбы проводилась на основе метода Моргенштерна-Прайса [94], относящегося к классу методов предельного равновесия, в котором удовлетворяется общее равновесие моментов и сил [31, 51]. В расчетах была использована упругопластическая модель поведения грунтов Кулона-Мора, которая объединяет упруго идеально пластическое поведение и линейный критерий прочности материалов [79].

Нахождение критической поверхности скольжения (ПС) (если она не задана априори) в методах предельного равновесия является многошаговым. На первом шаге определяется вероятная ПС и высчитывается коэффициент

устойчивости склона. Эта процедура повторяется для целого ряда возможных ПС. В итоге поверхность скольжения с наименьшим коэффициентом устойчивости определяется как критическая [29]. Исследования последних лет выявили возможность инкрементального изменения частей поверхности скольжения в результате которого происходит снижение коэффициента устойчивости склона, а сама ПС при этом приобретает вид, отличный от круглоцилиндрической. Данная техника минимизации коэффициента устойчивости за счет пошагового изменения частей вычисленной простой ПС получила название оптимизации поверхности скольжения [51]. В выполненных расчетах в качестве метода оптимизации был использован метод Суксоо.

Итоговая геомеханическая схема моделирования устойчивости дамбы с учетом процесса фильтрации приведена на рис. 3.13.

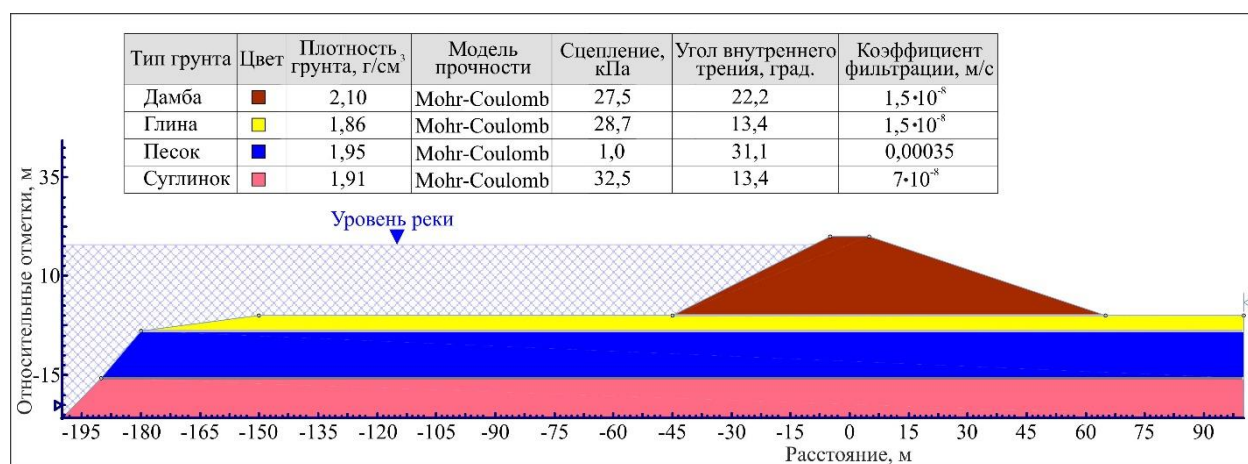


Рисунок 3.13. Геомеханическая схема

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:

- схема 1–5 м (инженерно-геологический подтип I-2);
- схема 2–10 м (инженерно-геологический подтип III-2);

- схема 3–15 м (инженерно-геологический подтип IV-2).

Выполненное математическое моделирование позволило оценить устойчивость дамбы на основе анализа изменения K_y откоса дамбы в период паводка.

Анализ результатов моделирования показал, что при мощности глинистого грунта 5 м (расчетная схема 1) коэффициент устойчивости (K_y) откоса дамбы до паводка – 1,53 (рис. 3.14), т.е. она устойчива. Однако после поднятия уровня воды в реке до максимальной отметки дамба разрушается, и на 8-й день K_y падает до 0,95 (рис. 3.15).

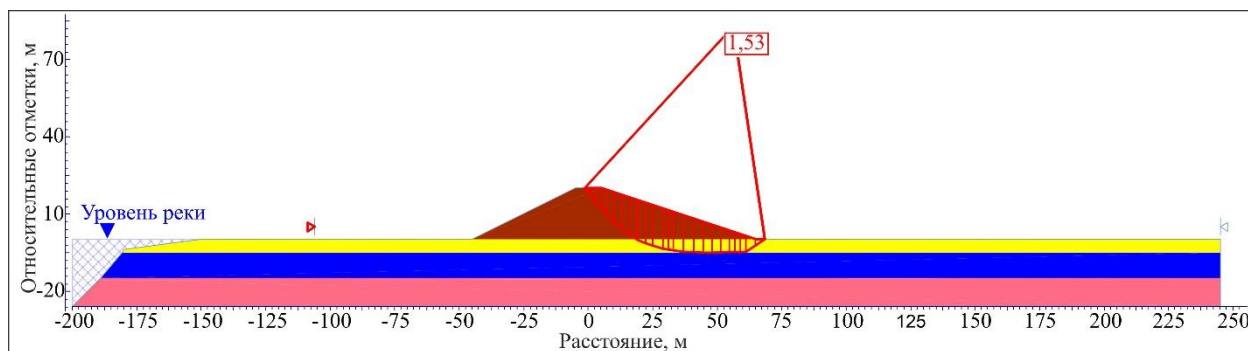


Рисунок 3.14. Результат расчета устойчивости дамбы до паводка – расчетная схема 1.
Условные обозначения: см. на рис. 3.13

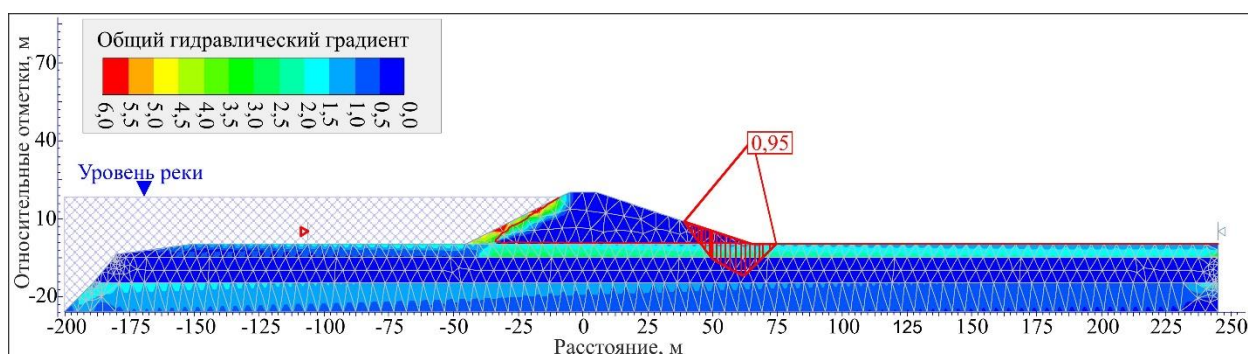


Рисунок 3.15. Результат расчета устойчивости дамбы на 8-й день после паводка – расчетная схема 1 (цветом показан гидравлический градиент)

При мощности глинистого грунта 10 м (расчетная схема 2) K_y откоса дамбы до паводка – 1,41 (рис. 3.16). После поднятия уровня воды в реке до максимальной отметки K_y откоса дамбы становится меньше 1 на 16-й день ($K_y = 0,99$) (рис. 3.17).

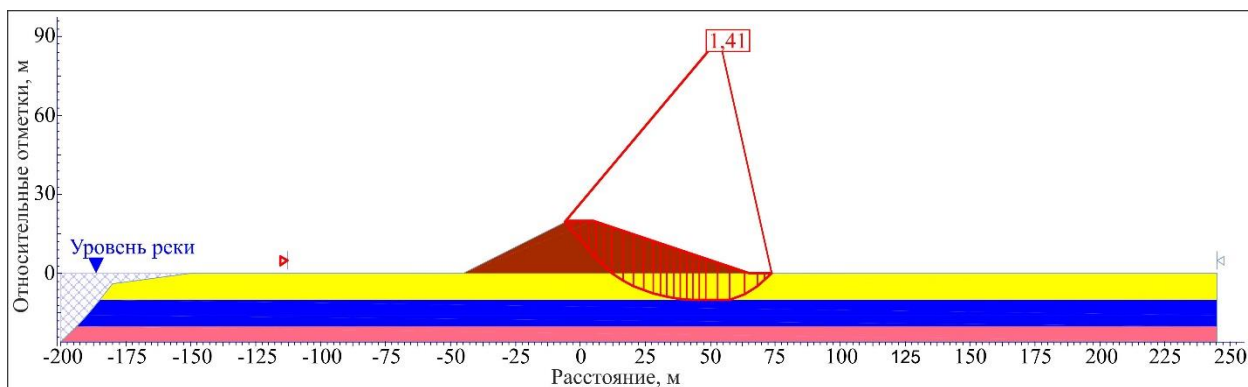


Рисунок 3.16. Результат расчета устойчивости дамбы до паводка – расчетная схема 2.
Условные обозначения: см. на рис. 3.13

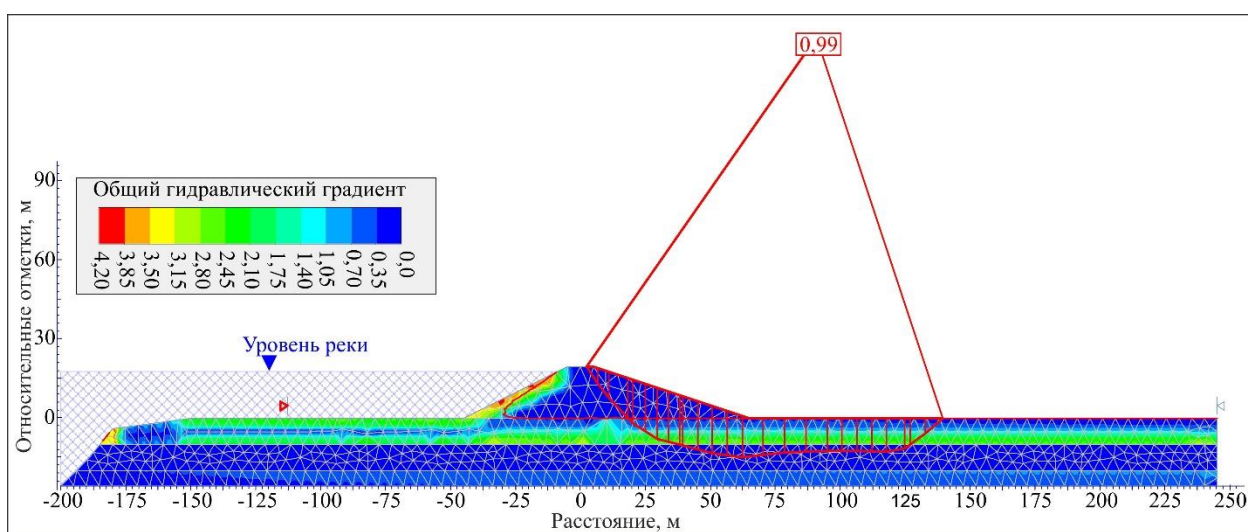


Рисунок 3.17. Результат расчета устойчивости дамбы на 16-й день после паводка – расчетная схема 2 (цветом показан гидравлический градиент)

При мощности глинистого грунта 15 м (расчетная схема 3) K_y внутреннего откоса дамбы до паводка – 1,39 (рис. 3.18). После поднятия уровня воды в реке до максимальной отметки дамба остается стабильной на весь срок паводка (через 20 дней $K_y = 1,01$) (рис. 3.19).

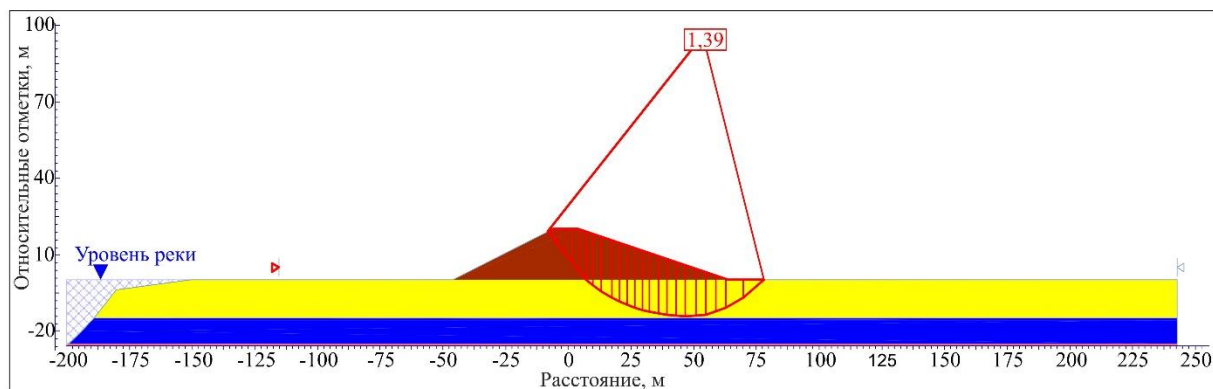


Рисунок 3.18. Результат расчета устойчивости дамбы до паводка – расчетная схема 3.
Условные обозначения: см. на рис. 3.13

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

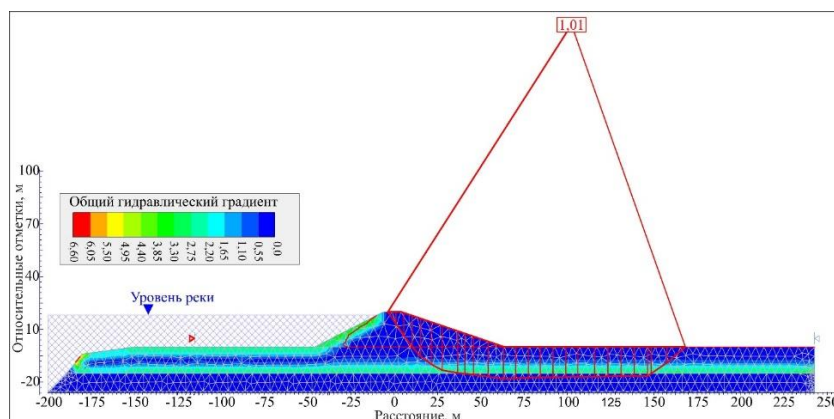


Рисунок 3.19. Результат расчета устойчивости дамбы на 20-й день после паводка – расчетная схема 3 (цветом показан гидравлический градиент)

На рисунке 3.20 приведен график зависимости коэффициента устойчивости дамбы от продолжительности паводка для слоя глины разной мощности. Его анализ показывает, что до начала паводка большей устойчивостью будут обеспечены откосы дамбы, в основании которой находится слой глин мощностью 5 м. В период паводка ситуация коренным образом изменяется, и надежность дамбы будет возрастать при увеличении мощности глин в ее основании.

На рисунке 3.21 приведен график зависимости площади сечения

потенциального блока обрушения от продолжительности паводка для слоя глины разной мощности. Анализ графика показывает, что с увеличением мощности глин в основании дамбы объем потенциально неустойчивых грунтов так же увеличивается.

Анализируя рисунки 3.16 и 3.18 (при мощности глинистого слоя в 10 м и более), можно заметить, что потенциальная зона смещения проходит не в глинах, а в песках, при этом она растягивается вдоль глинистого слоя на значительное расстояние. Данный факт объясняется тем, что согласно критерию прочности Мора-Кулона, сдвиговая прочность песков определяется углом внутреннего трения (сцепление близко к 0), а увеличение порового давления в них эквивалентно уменьшению угла внутреннего трения. На рис. 3.22 приведены графики распределения порового давления и изменения сдвиговой прочности вдоль плоскости скольжения.

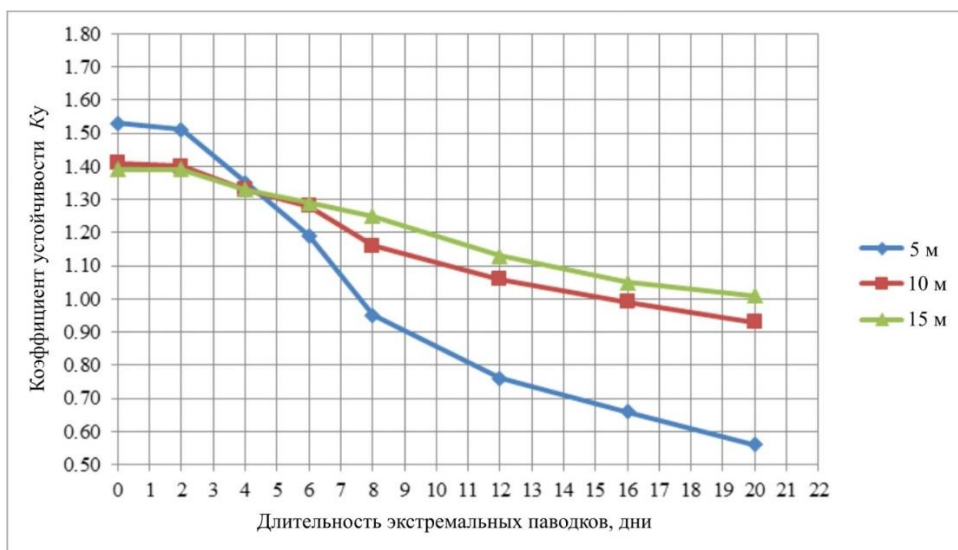


Рисунок 3.20. Зависимость коэффициента устойчивости от продолжительности паводка при разной мощности слоя глин в основании

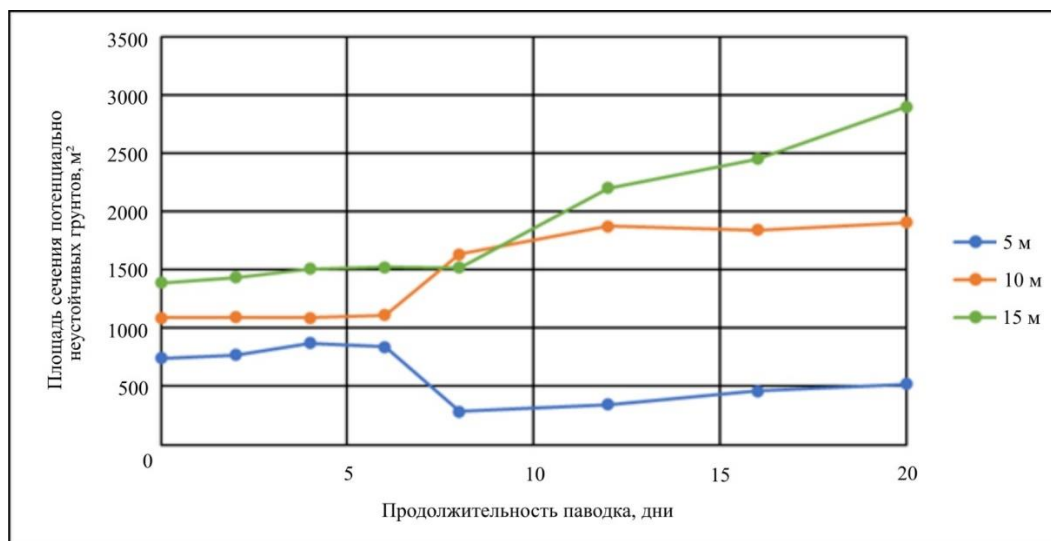


Рисунок 3.21. Зависимость площади сечения потенциального блока обрушения от продолжительности паводка при разной мощности слоя глин в основании

Из рисунка 3.22 следует, что поровое давление в грунтах, по которым проходит поверхность скольжения, достигает своих максимальных значений (более 300 кПа) на участке от 40 до 150 м. В свою очередь, сдвиговая прочность грунтов возрастает на протяжении порядка 10 м от места заложения потенциальной поверхности скольжения и далее начинает падать, а в интервале от 70 до 150 м становится равной нулю. Из этого следует, что оценку устойчивости откосов дамб при наличии в грунтах основания избыточного порового давления недопустимо производить на основе круглоцилиндрических плоскостей скольжения.

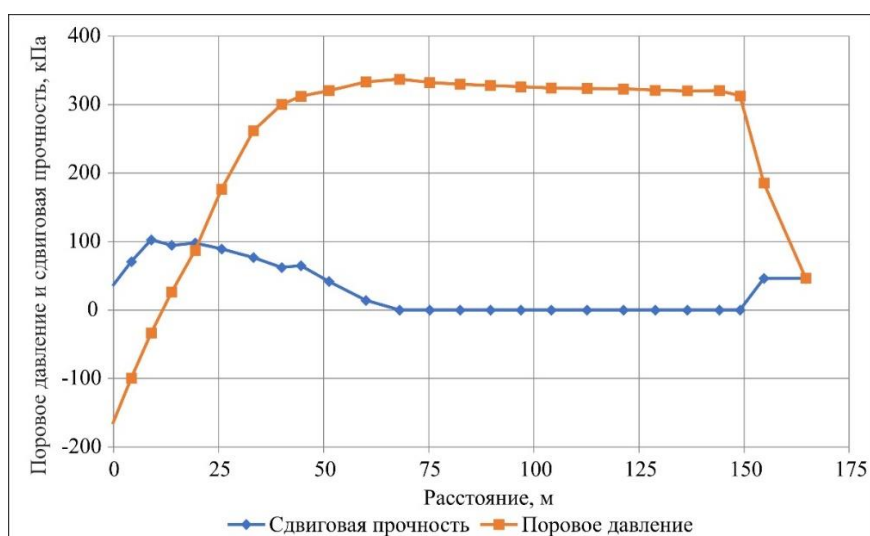


Рисунок 3.22. График распределения порового давления и сдвиговой прочности грунтов вдоль поверхности скольжения

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

Фильтрационную прочность основания дамбы можно оценить, сопоставляя полученные в результате моделирования характеристики фильтрационных полей (градиенты напора) с их критическими значениями [31]:

$$I_{est} \leq \frac{1}{\gamma_n} I_{cr}$$

Где: I_{est} – Действующий средний градиент напора в расчетной области фильтрации; I_{cr} – Критический средний градиент напора (принятый для глин равным 1,35); γ_n – Коэффициент надежности по ответственности сооружений (принятый равным 1) [31].

На рисунке 3.23 приведен график зависимости гидравлического градиента от продолжительности паводка для слоя глины разной мощности. Его анализ показывает, что при мощности глин 5 м величина гидравлического градиента превысит критическое значение через 3,5 дня. При мощности глин в основании дамбы 10 м, величина гидравлического градиента превысит критическое значение через 9 дней. При моделировании по третьей схеме (мощность слоя глин в основании дамбы 15 м) дамба при оценке фильтрационной прочности основания сохранит как устойчивость на весь период паводка.

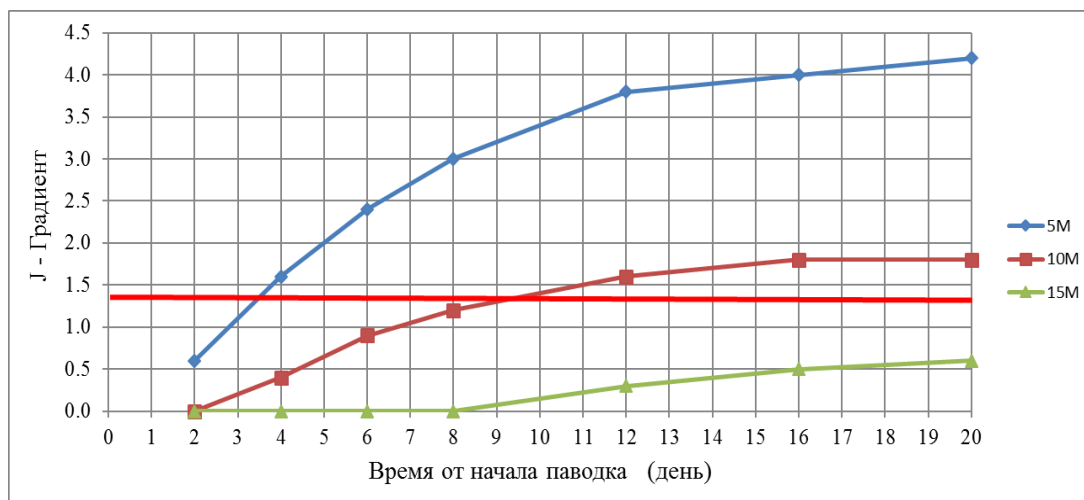


Рисунок 3.23. График изменение гидравлического градиента в грунтах основания дамбы от продолжительности паводка (красная линия – критический градиент)

Выполненные расчеты позволяют сделать следующие выводы:

– Геологическое строение грунтового массива в основании дамбы играет важную роль в обеспечении ее надежности в период паводков.

При мощности глин 5 м K_y откоса дамбы упадет ниже 1 через 7,5 дней. При мощности глин в основании дамбы 10 м K_y откоса дамбы упадет ниже 1,0 через 16 дней. При моделировании по третьей схеме (мощность слоя глин в основании дамбы 15 м) дамба сохранит устойчивость на весь период паводка.

– Увеличение мощности глин в основании дамбы и продолжительность паводка так же влияют как на форму критической поверхности скольжения, так и на объем потенциального блока обрушения; при этом с увеличением мощности глинистых грунтов объем потенциально неустойчивых грунтов так же возрастает.

– Результаты выполненного математического моделирования показали, что устойчивость дамбы зависит как от мощности глинистого слоя в ее основании, так и от продолжительности паводка.

Следует отметить, что падение K_y начинается не сразу, а только с третьего дня после подъема воды до максимального уровня.

– Важным результатом выполненного моделирования является установление следующего факта: устойчивость откоса дамбы в период паводка определяется, в большей степени, строением и свойствами грунтов, слагающих основание дамбы, чем свойствами грунтов тела дамбы.

– Оценку устойчивости откосов дамб при наличии в грунтах основания избыточного порового давления недопустимо производить на основе круглоцилиндрических плоскостей скольжения.

– Выявленные в процессе математического моделирования факторы, влияющие на устойчивость дамб в период паводков, можно использовать в прогнозных целях для оценки их надежности.

3.7. Оценка влияния неравномерной осадки грунтов основания на деформацию 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 может привести к ее неравномерным осадкам в процессе ее реконструкции, связанным, как правило, с увеличением высоты дамбы и как следствие с увеличением нагрузки на ее основание. 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 [14] и во время паводка могут стать причиной разрушения тела дамбы.

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 рассчитывается постадийно в соответствии с этапами строительства и реконструкции. В данном исследовании проведена оценка осадки дамбы для инженерно-геологических подтипов: I–1, I–2, II–1, II–2, III–1, III–2, IV–1, IV–2 (рис. 2.8).

Геомеханические схемы расчетов приведены на рисунках 3.24 б – 3.31 б.

В итоге выполненного математического моделирования были получены следующие результаты:

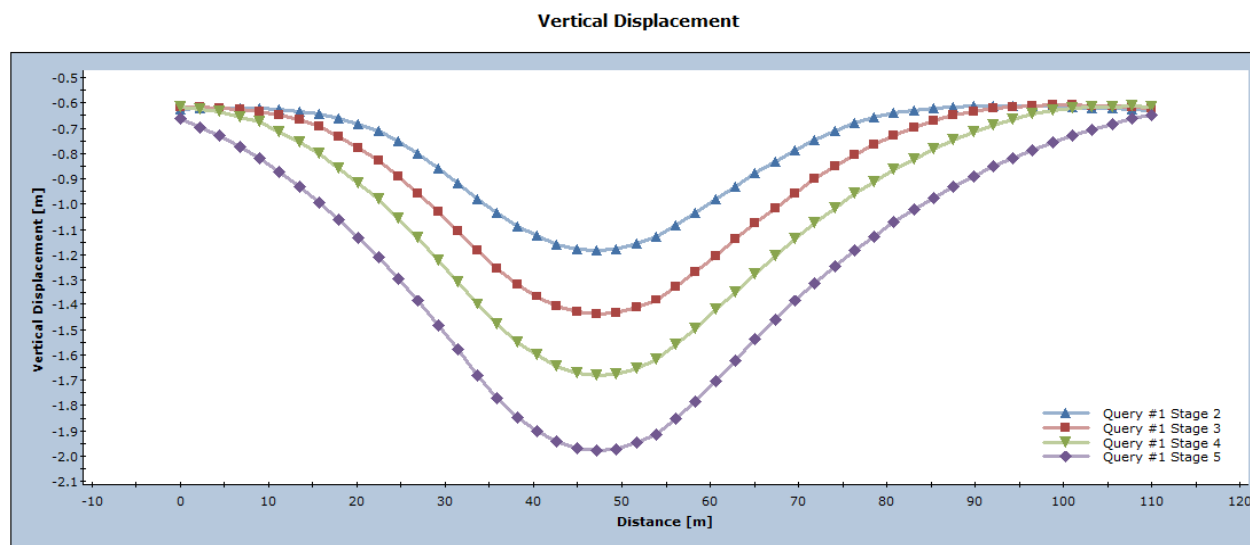
- Для подтипа I–1: результат расчета показан на рисунке 3.24 а. При высоте дамбы 20,0 м, осадка основания составила 1,98 м. Осадка основания в последнем этапе строительства составила 0,30 м.
- Для подтипа I–2: результат расчета показан на рисунке 3.25 а. При высоте дамбы 20,0 м, осадка основания – 1,02 м. Осадка основания в последнем этапе строительства составила 0,15 м.

- Для подтипа II–1: результат расчета показан на рисунке 3.26 а. При высоте дамбы 20,0 м, осадка основания – 1,36 м. Осадка основания в последнем этапе строительства составила 0,21 м.
- Для подтипа II–2: результат расчета показан на рисунке 3.20 а. При высоте дамбы 20,0 м, осадка основания – 1,92 м. Осадка основания в последнем этапе строительства составила 0,32 м.
- Для подтипа III–1: результат расчета показан на рисунке 3.28 а. При высоте дамбы 20,0 м, осадка основания – 2,37 м. Осадка основания в последнем этапе строительства составила 0,39 м.
- Для подтипа III–2: результат расчета показан на рисунке 3.29 а. При высоте дамбы 20,0 м, осадка основания – 1,03 м. Осадка основания в последнем этапе строительства составила 0,15 м.
- Для подтипа IV–1: результат расчета показан на рисунке 3.30 а. При высоте дамбы 20,0 м, осадка основания – 2,62 м. Осадка основания в последнем этапе строительства составила 0,42 м.
- Для подтипа IV–2: результат расчета показан на рисунке 3.31 а. При высоте дамбы 20,0 м, осадка основания – 1,22 м. Осадка основания в последнем этапе строительства составила 0,18 м.

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.

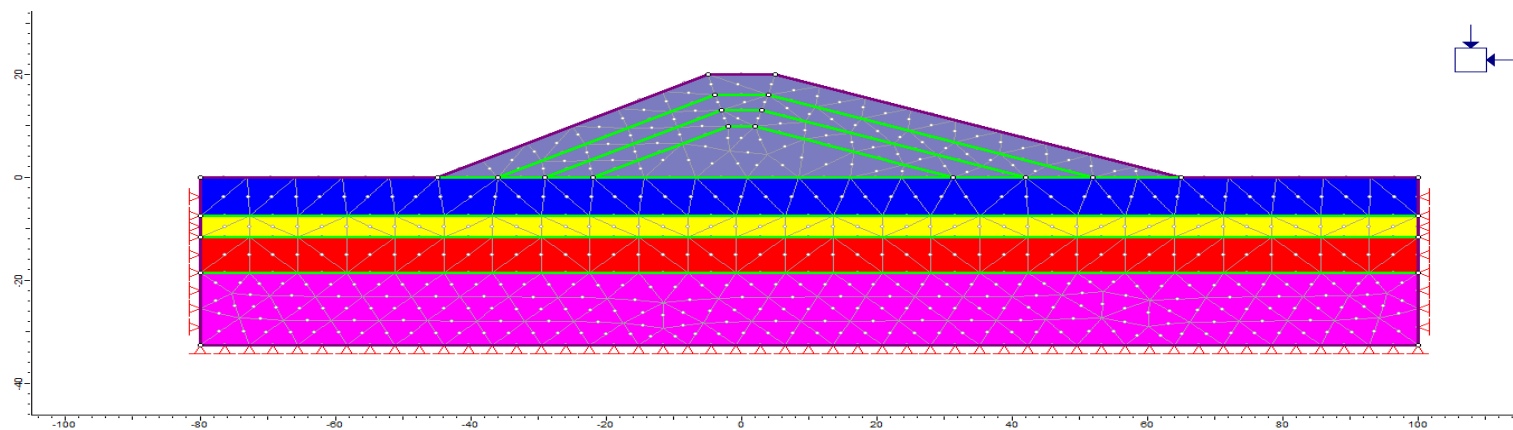
Из результатов расчета осадки основания в подзонах видно, что на участках, в которых присутствуют слабые грунты (типы I–1; II–1; II–2; III–1; IV–1) происходит большая осадка, и наоборот, на участках (типы I–2; III–2; IV–2), где слабые грунты отсутствуют, осадка основания имеет довольно малое значение.

.



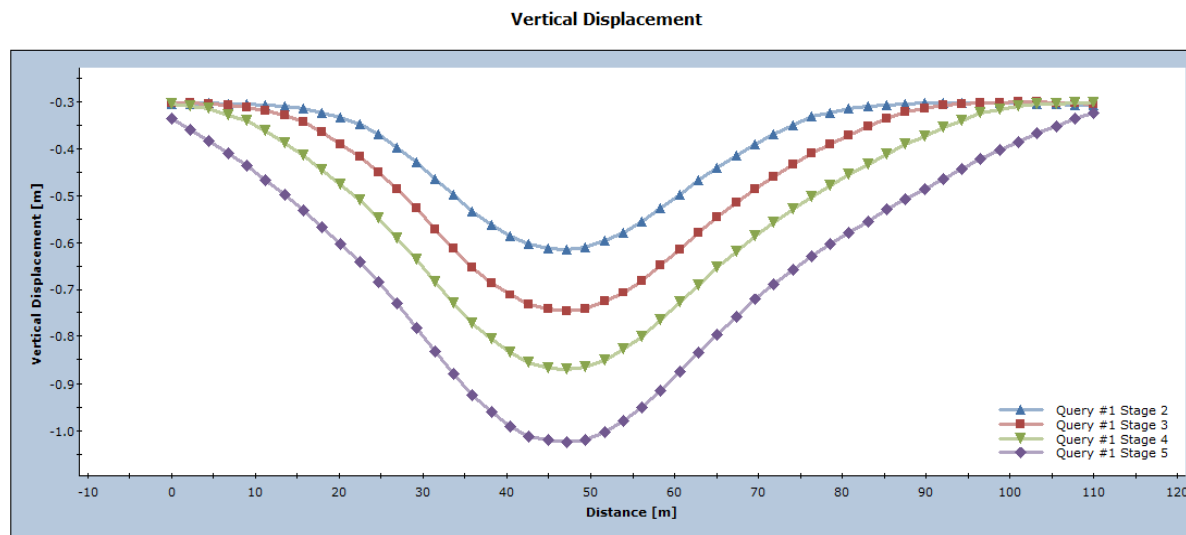
Этап	Высота дамбы (м)	Осадка основания (м)
1	10	1,18
2	13	1,44
3	16	1,68
4	20	1,98

а. Результат расчета



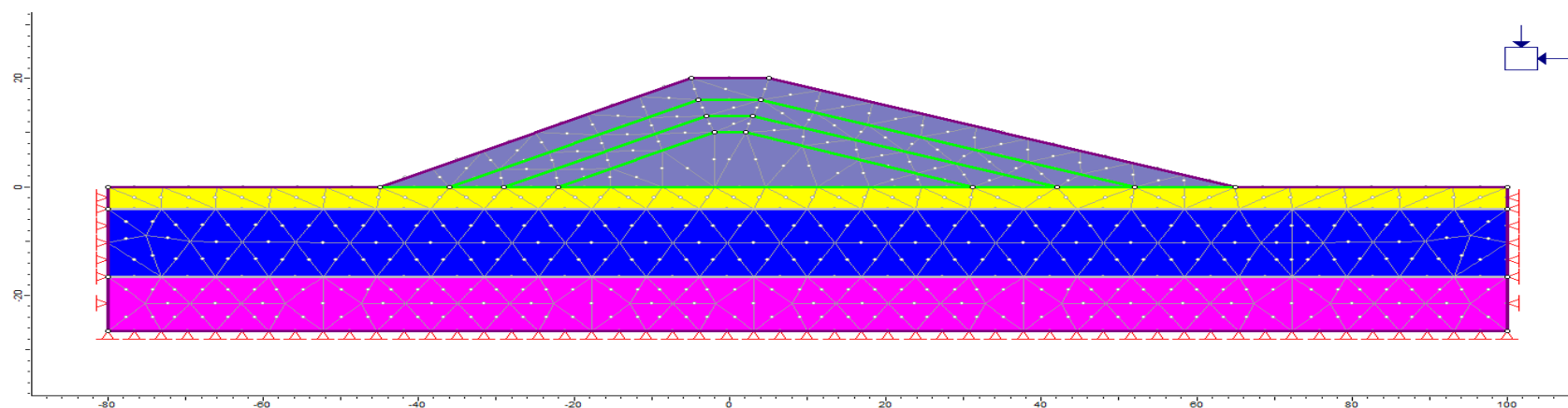
б. Модель расчета

Рисунок 3.24. Модель и результат расчета осадки основания для типа разреза I–1



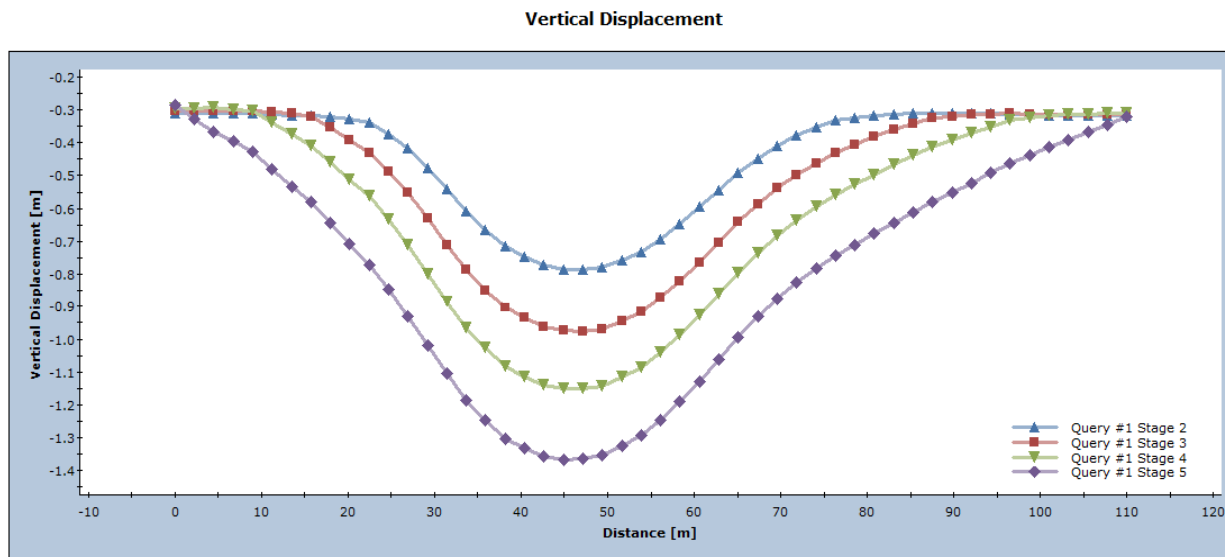
Период	Высота (м)	дамбы	Осадка основания (м)
1	10		0,61
2	13		0,76
3	16		0,87
4	20		1,02

а. Результат расчета



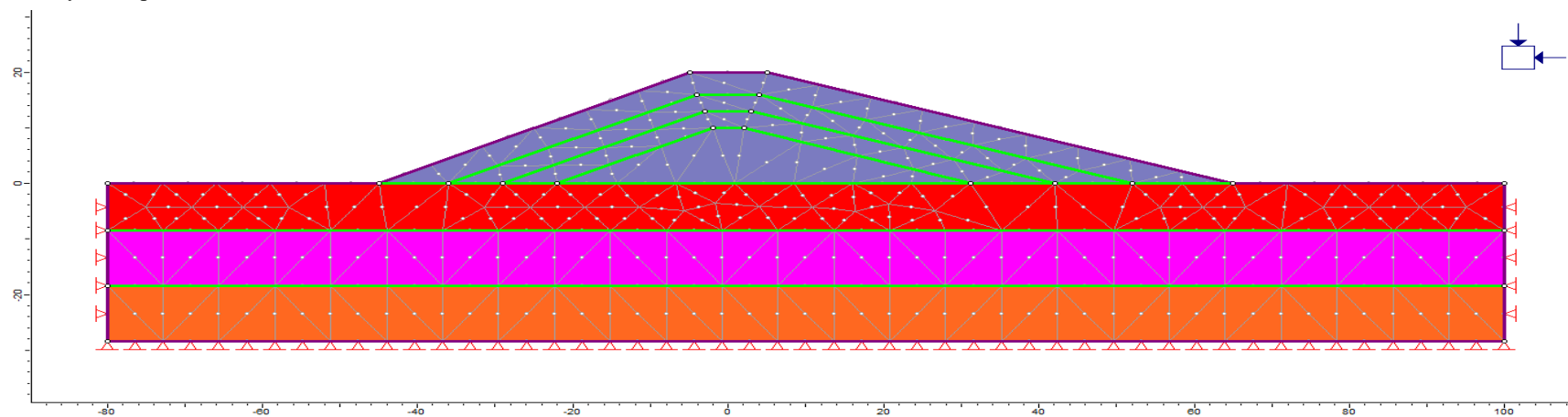
б. Модель расчета

Рисунок 3.25. Модель и результат расчета осадки основания для типа разреза I–2



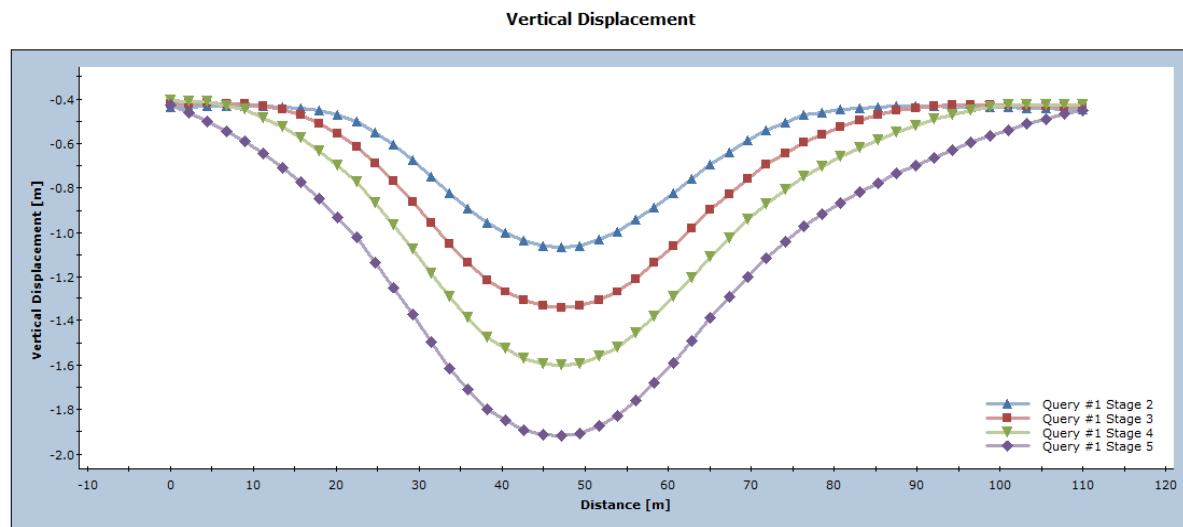
Период	Высота дамбы (м)	Осадка основания (м)
1	10	0,78
2	13	0,96
3	16	1,15
4	20	1,36

а. Результат расчета



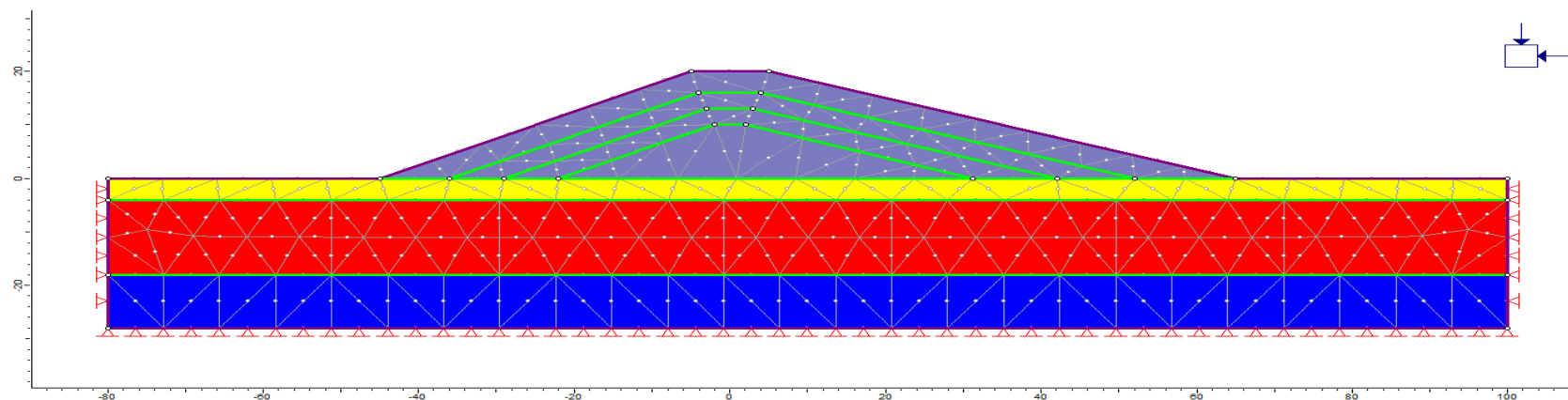
б. Модель расчета

Рисунок 3.26. Модель и результат расчета осадки основания для типа разреза II-1



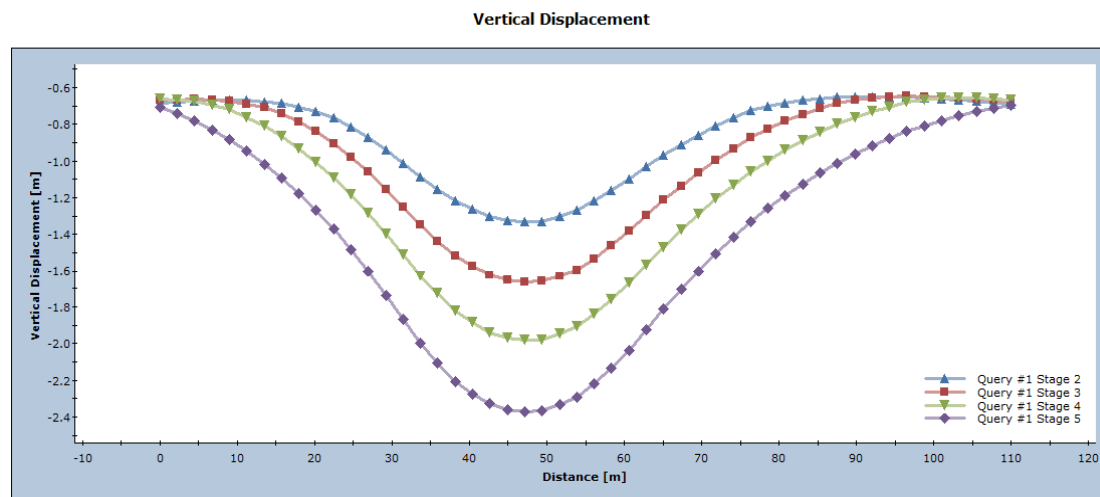
Период	Высота дамбы (м)	Осадка основания (м)
1	10	1,06
2	13	1,34
3	16	1,60
4	20	1,92

а. Результат расчета



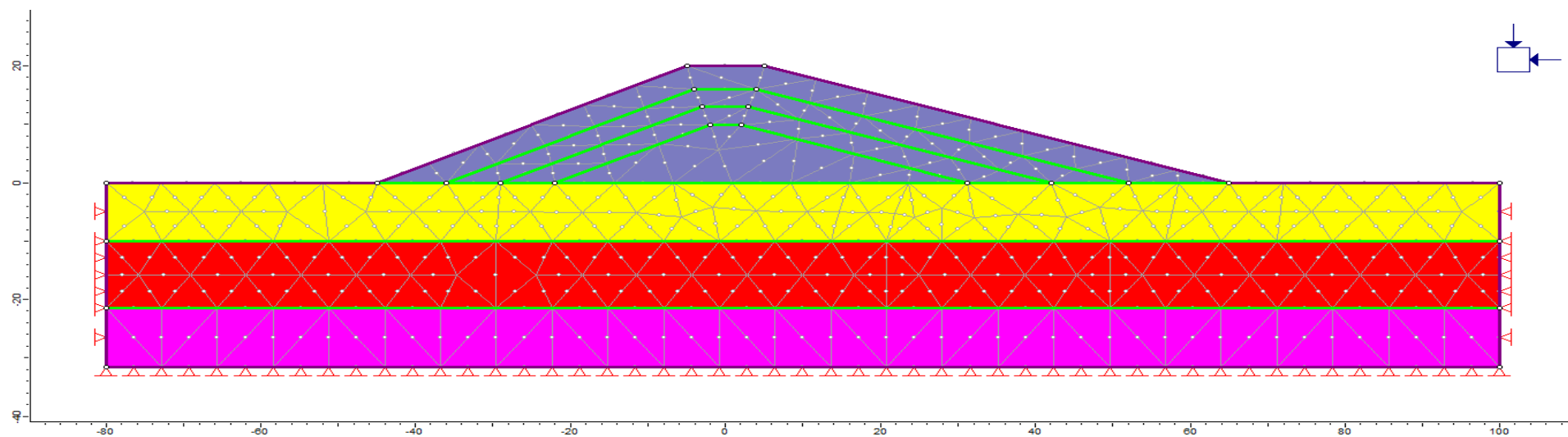
б. Модель расчета

Рисунок 3.27. Модель и результат расчета осадки основания для типа разреза II–2



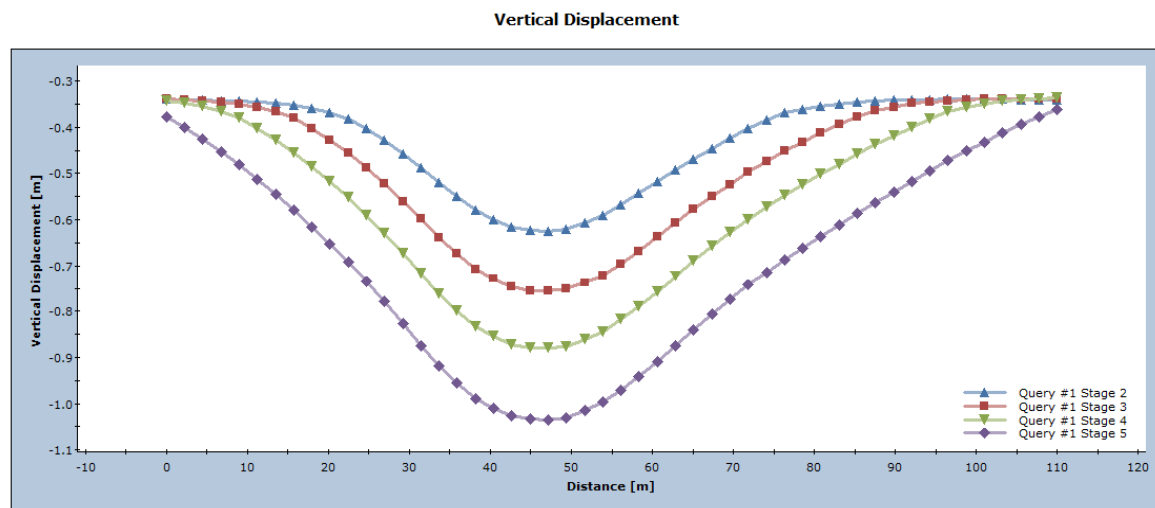
Период	Высота дамбы (м)	Осадка основания (м)
1	10	1,33
2	13	1,66
3	16	1,98
4	20	2,37

а. Результат расчета



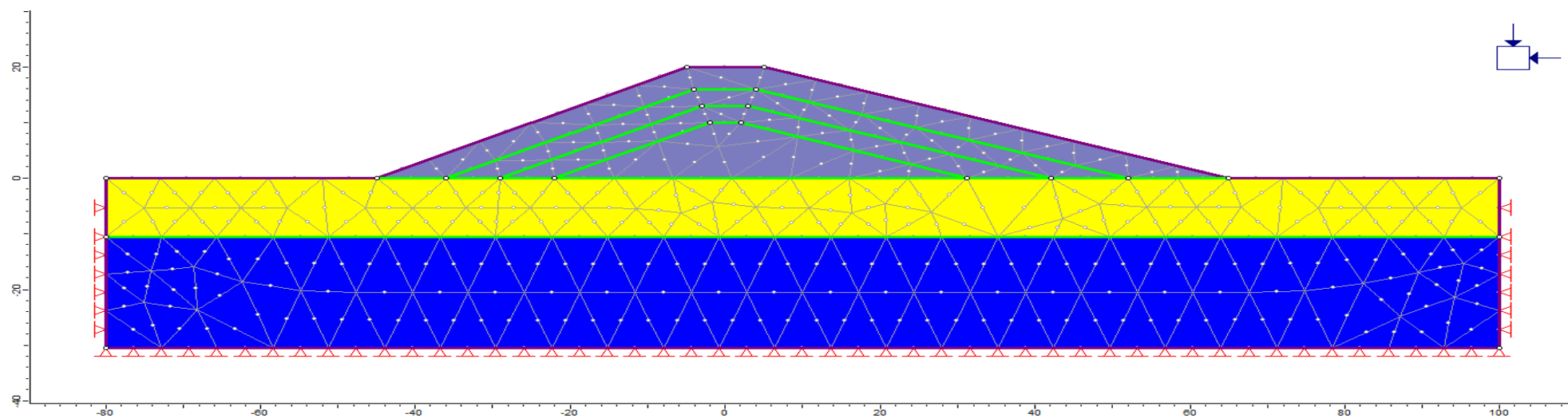
б. Модель расчета

Рисунок 3.28. Модель и результат расчета осадки основания для типа разреза III–1



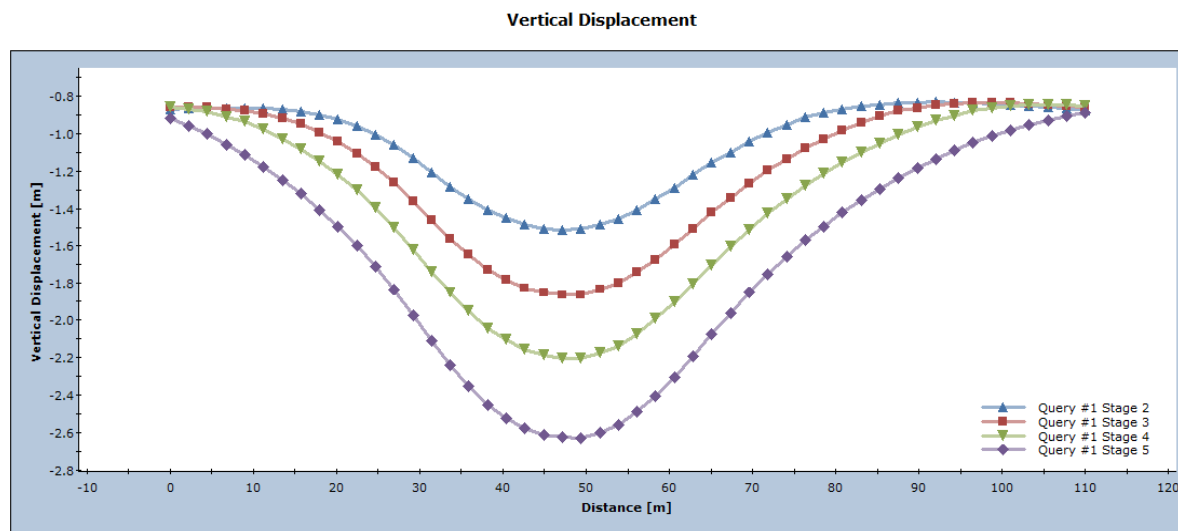
Период	Высота дамбы (м)	Осадка основания (м)
1	10	0,62
2	13	0,76
3	16	0,88
4	20	1,03

а. Результат расчета



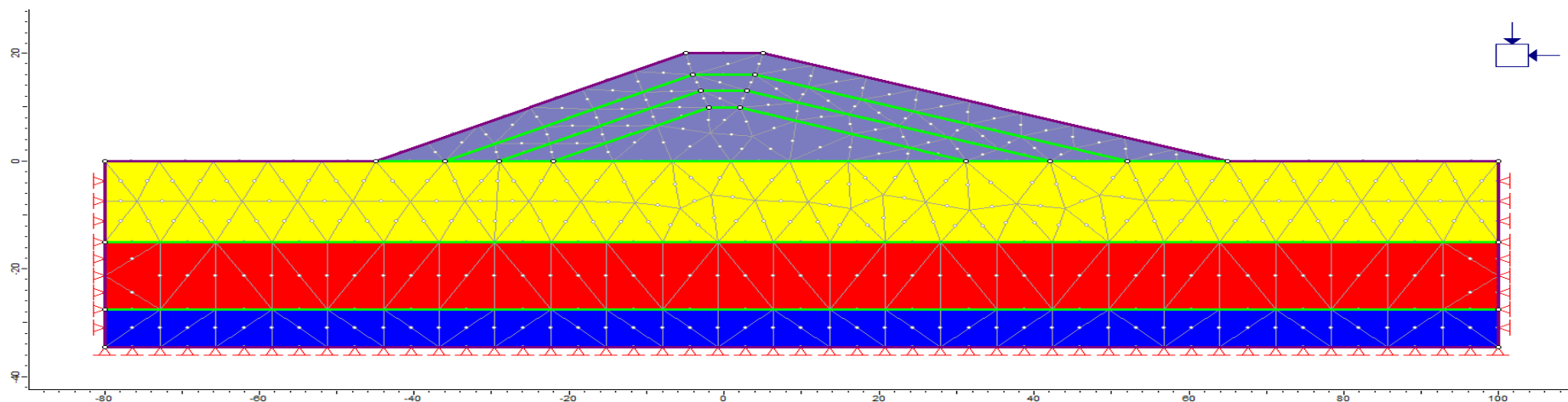
б. Модель расчета

Рисунок 3.29. Модель и результат расчета осадки основания для типа разреза III–2



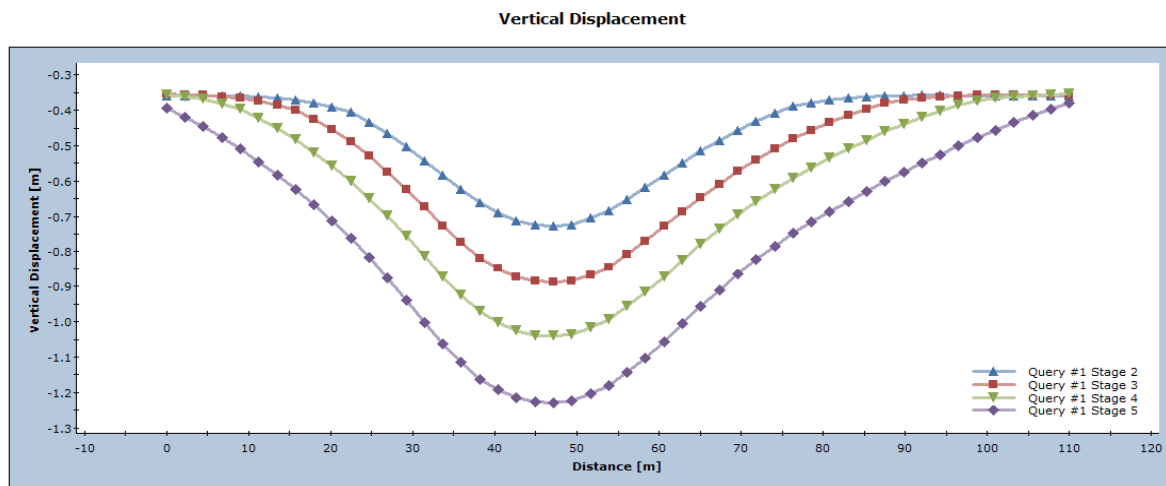
Период	Высота дамбы (м)	Осадка основания (м)
1	10	1,51
2	13	1,86
3	16	2,20
4	20	2,62

а. Результат расчета



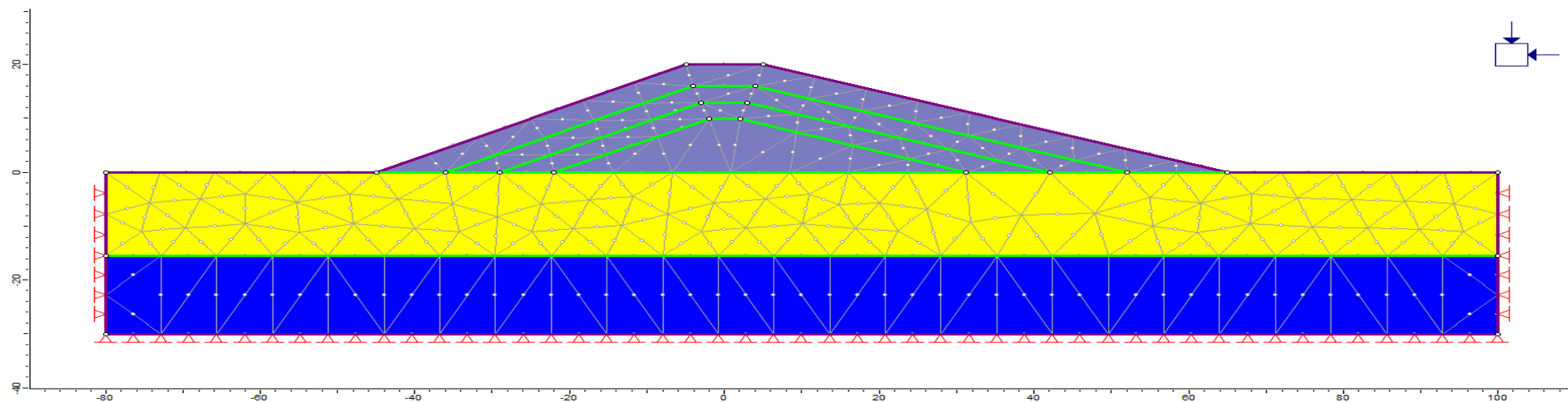
б. Модель расчета

Рисунок 3.30. Модель и результат расчета осадки основания для типа разреза IV–1



Период	Высота дамбы (м)	Осадка основания (м)
1	10	0,73
2	13	0,89
3	16	1,04
4	20	1,22

а. Результат расчета



б. Модель расчета

Рисунок 3.31. Модель и результат расчета осадки основания для типа разреза IV-2

3.8. 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).

Использованию RLEM при оценке устойчивости склонов и откосов посвящены исследования Fenton, G.A., and Griffiths, D.V. (2008) [78], Li and Lumb (1987) [90], Li et al. (2014) [89], El-Ramly et al. (2001) [75], Low (2003) [91], Babu and Mukesh (2004) [63], Cho (2007 and 2010) [66, 67], Hong and Roh (2008) [83], Wang et al. (2011) [113], Ji et al. (2012) [85] и др.

Так как, в расчетах использовался критерий прочности Мора-Кулона, то была учтена пространственная изменчивость сцепления и угла внутреннего трения.

Для оценки влияния неоднородности на вероятность разрушения откоса дамбы, при выполнении расчетов были рассмотрены четыре случая: – общий вероятностный анализ (без учета корреляционного расстояния) вероятностные анализы с различной величиной корреляционного расстояния в горизонтальном направлении 3, 5 и 10 м. В вертикальном направлении величина корреляционного расстояния для всех случаев составила 1 м.

Вероятностные свойства грунтов, используемые при моделировании приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

Вероятностные свойства грунтов тела дамбы

ИГЭ	Цвет	Свойства	Распределение	Среднее	Среднеквадратическое отклонение
Техногенные грунты тела дамбы		Сцепление (кПа)	Нормальное	27.5	2
		Угол вн. трения (градусы)	Нормальное	22.18	2

На рис. 3.32 приведен пример результатов построения расчетных моделей неопределенности (для корреляционного расстояния в горизонтальном направлении равном 1 м при минимальном K_y).

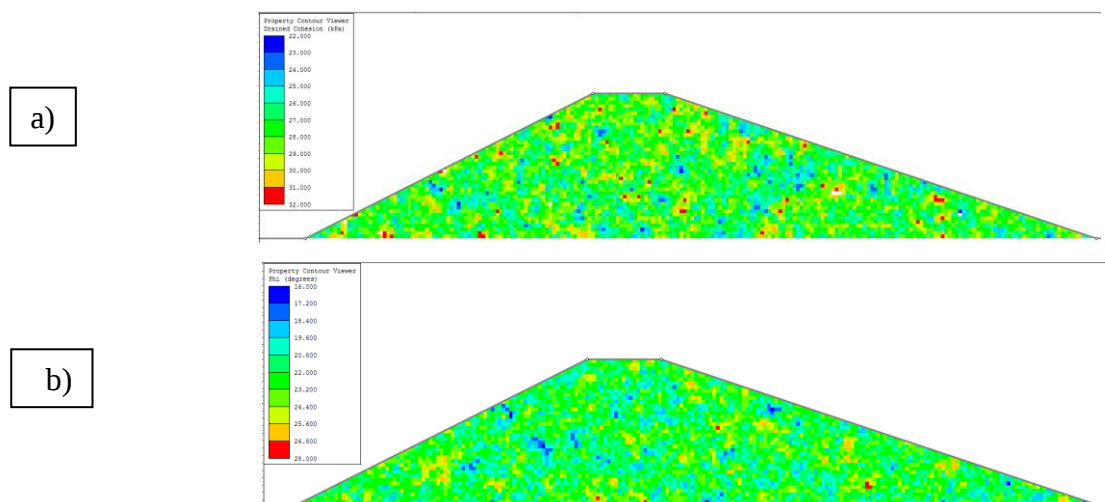


Рисунок 3.32. Распределение сцепления (а) и угла внутреннего трения (б) в грунтах тела дамбы при корреляционном расстоянии в горизонтальном направлении равном 1 м, $K_y=0.88$.

На рисунке 3.33 приведен результат расчета устойчивости откоса при величине корреляционного расстояния 1 м (в горизонтальном направлении) для грунтов, составляющих тело дамбы.

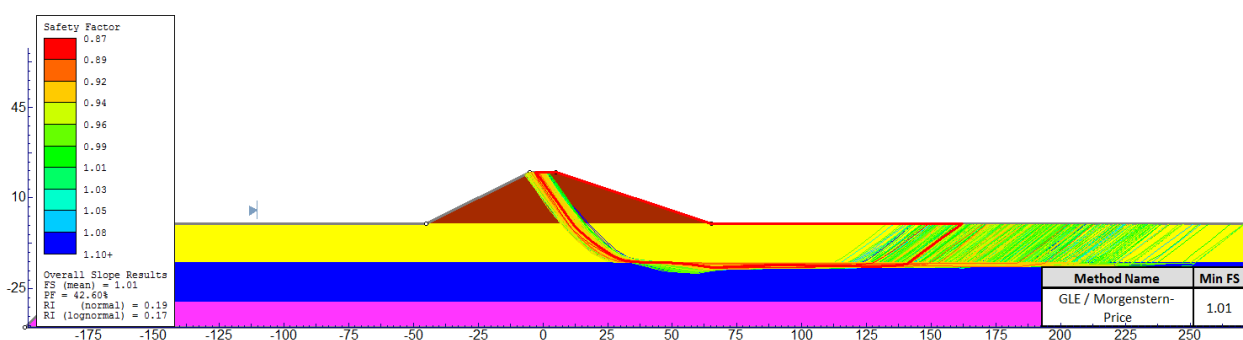


Рисунок 3.33. Результаты расчета устойчивости откоса при величине корреляционного расстояния 1 м (в горизонтальном направлении)

Анализ результатов расчета для различных описанных выше случаев показал, что величина корреляционного расстояния не влияет на F_s откоса (для всех случаев средний $K_y = 1.01$). Однако, вероятность обрушения откоса при изменении величины корреляционного расстояния меняется. На рисунке 3.34

приведен график зависимости вероятности обрушения от корреляционного расстояния.

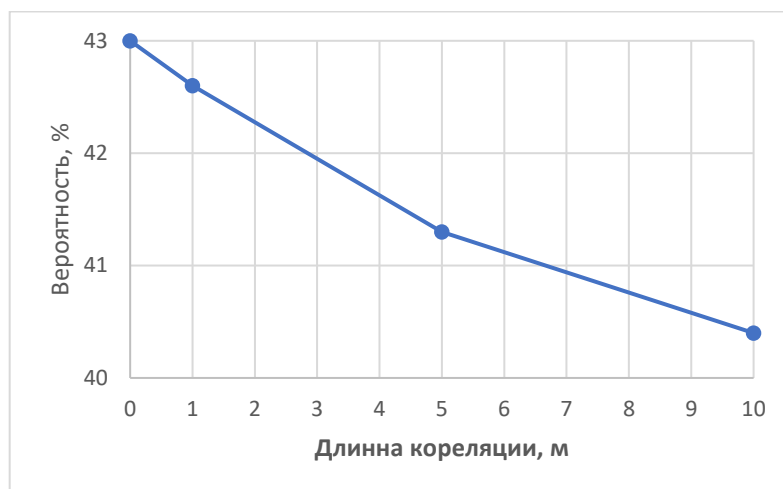


Рисунок 3.34. График зависимости вероятности обрушения от корреляционного расстояния

Анализ приведенного графика показывает, что пренебрежение корреляционным расстоянием повышает вероятность обрушения откоса. Так же видно, что с уменьшением корреляционного расстояния и, как следствие, с возрастанием неоднородности в грунтах тела дамбы, вероятность развития оползневого процесса в откосе дамбы так же возрастает и, наоборот, с уменьшением неоднородности грунтов тела дамбы (с увеличением корреляционного расстояния) вероятность разрушения откоса падает.

Выполненное исследование позволяет сделать следующие выводы:

- 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 – среднеквадратическое 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.

3.9. Зонирование дамбы по опасности развития деформаций

Из результатов расчета в частях 3.4.1 и 3.4.2 видно, что неоднородное геологическое строение основания дамбы р. Красной, вызывает множество геодинамических процессов, влияющих на устойчивость дамбы. Следовательно, на нее влияет отрицательно и само геологическое строение. Поэтому его изучение и оценка развития динамических геологических процессов необходимы для прогнозирования и предложения безопасных решений для длительной эксплуатации дамбы. Основную роль в устойчивости дамбы играет мощность глинистых грунтов в верхней части разреза аллювиальных отложений.

В итоге область расположения дамбы удалось разделить на 4 зоны, характеризующиеся преимущественным развитием определенных геологических процессов, которые влияют на ее устойчивость. Подробная информация об опасных геологических зонах вдоль дамбы показана в таблице 3.2 и рисунке 3.35.

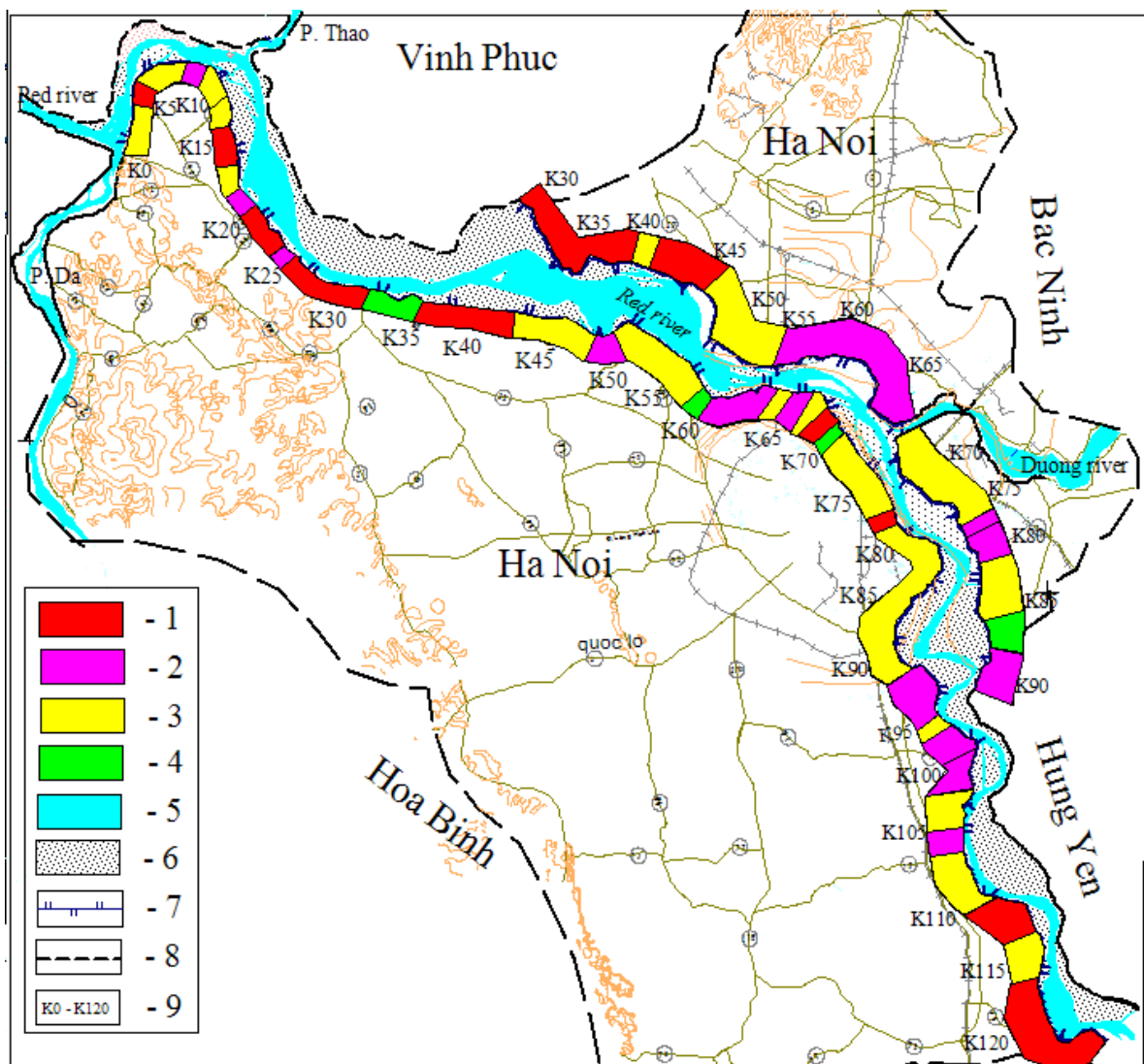


Рисунок 3.35. Карта распространения опасных по развитию деформаций участков основания дамбы р. Красной. Условные обозначения: 1 – Первая зона; 2 – Вторая зона; 3 – Третья зона; 4 – Четвертая зона; 5 – Красная река; 6 – Песчаная отмель около реки; 7 – Дамба; 8 – Границы между административными районами; 9 – Километры длины дамбы

Таблица 3.2

Зоны дамбы Красной реки, выделенные по развитию характерных деформаций

Зона	Тип разреза	Оценка причин неустойчивости	Интервалы длины дамбы	
			На правом берегу	На левом берегу
1	I-1	Дамба неустойчива из-за фильтрационного потока в основании и очень большой неравномерной осадки дамбы	15,5–17,3 км; 20,5–24,9 км; 25,4–30,7 км	30,0–39,5 км; 40,5–42,5 км
	II-1		3,5–5,0 км; 35,0–42,0 км; 56,7–58,0 км; 68,3–69,7 км; 78,4–79,0 км; 111,1–114,2 км; 117,5–120,0 км	42,5–45,0 км
2	I-2	Дамба неустойчива из-за фильтрационного потока в основании	48,2–49,2 км; 65,3–66,7 км; 92,5–96,6 км; 97,7–100,8 км; 105,7–107,1 км	55,0–68,5 км; 78,0–80,3 км; 81,5–83,8 км; 87,0–90,0 км
	III-2		8,8–10,0 км; 19,0–20,5 км; 24,9–25,4 км; 58,8–64,2 км; 70,3–71,0 км; 100,8–103,3 км	77,4–78,0 км
3	II-2	Дамба неустойчива из-за очень большой неравномерной осадки дамбы	10,0–12,8 км; 13,5–15,5 км; 43,4–45,0 км; 64,2–65,3 км; 66,7–68,3 км; 71,0–74,8 км; 75,4–78,0 км; 79,4–80,0 км; 90,5–92,5 км; 96,6–97,7 км; 103,3–105,7 км; 107,1–109,1 км; 114,2–117,5 км	39,5–40,5 км; 75,8–77,4 км
	III-1		1,5–3,5 км; 12,8–13,5 км; 17,3–19,0 км; 45,0–48,2 км; 50,0–56,7 км; 74,8–75,4 км; 87,5–90,5 км; 109,1–111,1 км	45,8–51,3 км; 72,3–73,1 км; 80,3–81,5 км; 83,8–85,8 км
	IV-1		0,0–1,5 км; 5,0–8,8 км; 42,0–43,4 км; 49,2–50,0 км; 80,0–87,5 км	45,0–45,8 км; 51,3–55,0 км; 68,5–72,3 км; 73,1–75,8 км
4	IV-2	Устойчивость дамбы высокая	30,7–35,0 км; 58,0–58,8 км; 69,7–70,3 км	85,8–87,0 км

Выводы

1. По итогам анализа протекания различных процессов (фильтрация, оползневой процесс и вертикальная деформация сжимаемой толщи) автору удалось выбрать методы для оценки (расчета) устойчивости откоса, влияния фильтрации и геологического строения на устойчивость основания и откосов дамбы.

2. По результатам анализа существующих специализированных программ для расчета проницаемости пород, устойчивости склонов, осадки сооружений автором были выбраны: GEOSLOP для расчета устойчивости к сдвигу, RS 2 для расчета осадки основания и SLIDE для расчета и оценки влияния проницаемости горных пород на устойчивость дамбы, – что позволило решить все поставленные задачи.

3. На основе результатов расчета для каждой исследовательской задачи (развитие оползневых деформаций на внешнем и внутреннем откосах дамбы, фильтрационные деформации грунтов и внутреннего откоса дамбы, разрушение берегов р. Красной) установлена причина и механизм процесса разрушения дамб. На основании этой оценки произведено зонирование дамбы и прогнозирование потенциальных опасных геологических процессов.

4. ОБОСНОВАНИЕ РЕШЕНИЙ ПО СТАБИЛИЗАЦИИ ДАМБЫ

Выявление причин и механизмов разрушения дамбы (оползни в откосах дамбы) и оползней по берегам реки (глава 3) доказывает влияние повышения и быстрого понижения уровня воды в реке на устойчивость берега реки и конструкции дамбы. Кроме того, повышение уровня воды в реке в течение длительного времени также приводит к неустойчивости дамбы. Слабые грунты в основании дамб, мощности которых сильно варьируются, вызывают деформацию поверхности дамбы.

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 исследовать и выбирать оптимальные способы, которые ограничат развитие опасных процессов в прибрежных районах р. Красной.

4.1. Меры по повышению устойчивости дамбы

4.1.1. Выполаживание откосов дамбы

Выполаживание откосов дамбы путем отсыпки одного из ее откосов или сразу обоих является одним из способов повышения ее устойчивости (рис. 4.1). Во многих случаях, образованная на внутреннем откосе в результате

расширения дамбы берма используется для проложения дорог. Такой способ защиты приводит к увеличению коэффициента устойчивости откоса. Материалами, используемыми для расширения насыпи на откосе дамбы является глинистый грунт с маленьким коэффициентом фильтрации ($K_f < 10^{-6}$ м/сут). На основе анализа преимуществ и недостатков этого способа защиты, наряду с геологическими и топографическими условиями района, выбирается соответствующее управляющее решение.

+ *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 и невозможность ее возведения в густонаселенных районах. Кроме того, использование больших объемов строительных материалов насыпного грунта.

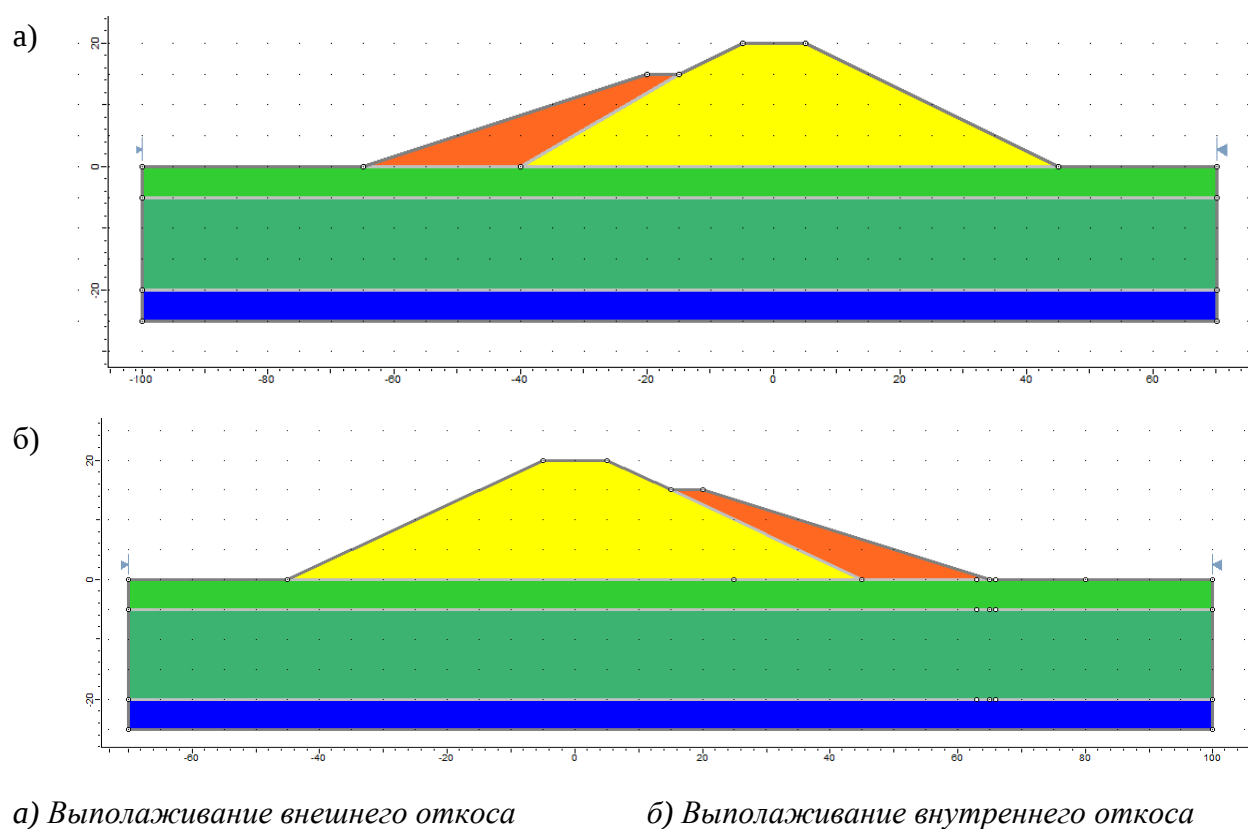


Рисунок 4.1. Выполаживание откосов дамбы

а) Повышение устойчивости внутреннего откоса дамбы

Согласно анализу причин и механизма формирования оползней в теле дамбы р. Красной (раздел 3.5) в сезоны дождей, когда уровень воды в реке и уровень подземных вод в теле дамбы постепенно повышаются, также изменяется напряженное состояние и физико-механические свойства грунтов в теле дамбы. Другими словами, поровое давление воды в грунте тела дамбы изменяется из-за колебания уровня воды в реке. Такая активная динамика в течении года влияет на снижение устойчивости откоса дамбы. По результатам расчета видно, что коэффициент устойчивости (K_y) внутреннего откоса, снижается от 1,14 до 0,89 (откос дамбы теряет устойчивость). В этом случае, нужно рекомендовать принять меры по его расширению и выполаживанию, а также, в качестве дополнительной меры, строительство вертикального дренажа в ее основании для обеспечения безопасной эксплуатации дамбы.

Этот метод хорошо работает, когда внутренний откос дамбы имеет оптимальный уклон, и на него непосредственно не влияет уровень воды. Кроме того, это решение также снижает активное давление воды на тело дамбы. Таким образом, при таком подходе, длина внутреннего откоса дамбы увеличивается и снижается давление воды, действующее на тело дамбы. Модель и результаты расчетов показаны на рисунке 4.2.

Анализ рисунков 3.9 (3-ая глава) и 4.2 показывает, 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 и дренаж в ее основании, повышает ее устойчивость в период экстремального паводка.

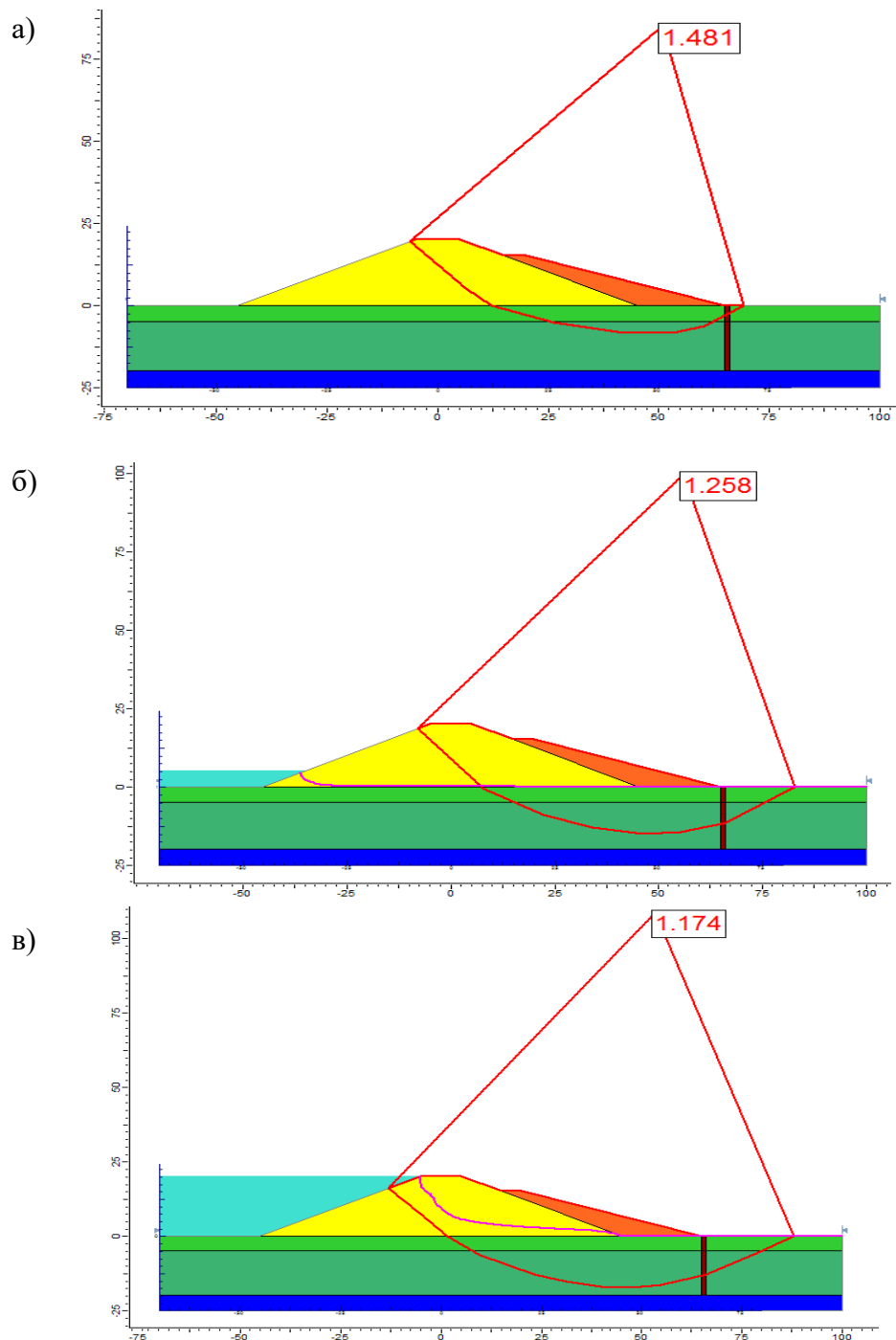


Рисунок 4.2. Поперечный разрез дамбы. Оценка устойчивости внутреннего откоса после его расширения при повышении уровня воды в период экстремального паводка: а) без учета влияния подземных вод K_y — 1,481; б) при повышении уровня воды на начальный период экстремального паводка K_y — 1,258; в) при повышении уровня воды на конечный период экстремального паводка K_y — 1,174

б) Повышение устойчивости внешнего откоса дамбы

Согласно анализу причин и механизма оползней на теле дамбы р. Красной, когда уровень воды в реке поднимается в конце экстремального паводка и быстро опускается после него (раздел 3.5), коэффициент

устойчивости (K_y) внешнего откоса снижается от 1,6 до 0,92 (теряет устойчивость). Это указывает на то, что, когда гидростатическое давление на откос дамбы уменьшается, коэффициент устойчивости также уменьшается. При этом избыточное поровое давление в грунте (тело дамбы) снижает прочность на сдвиг грунта, поэтому возникает оползень в откосе дамбы.

Таким образом, для обеспечения устойчивости откоса дамбы в этом случае необходимо расширять и/или выглаживать внешний откос (рис. 4.1 а). При таком решении, внешний откос дамбы увеличивается, а коэффициент устойчивости повышается. В качестве доказательства на рисунке 4.3 показаны расчетные модели проверки устойчивости внешнего откоса.

Анализ рисунков 3.10, 3.11 (3-ая глава) и 4.3 показывает, что после расширения внешнего откоса дамбы, 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.

4.1.2. Создание вертикальной дренажной системы

Дренажные скважины, которые используются для снижения фильтрационного давления в основании дамб, являются довольно популярной мерой обеспечения устойчивости дамбы при повышении уровня воды реки. Через них подземные воды будут автоматически (самоизливом) разгружаться на поверхность земли, что уменьшит давление фильтрационного потока и позволит установить за ним контроль, тем самым, свести к минимуму возникновение таких неблагоприятных процессов, как: плыун, суффозия и даже разрушение основания дамбы. Схема расположения дренажной скважины приведена на рисунке 4.4.

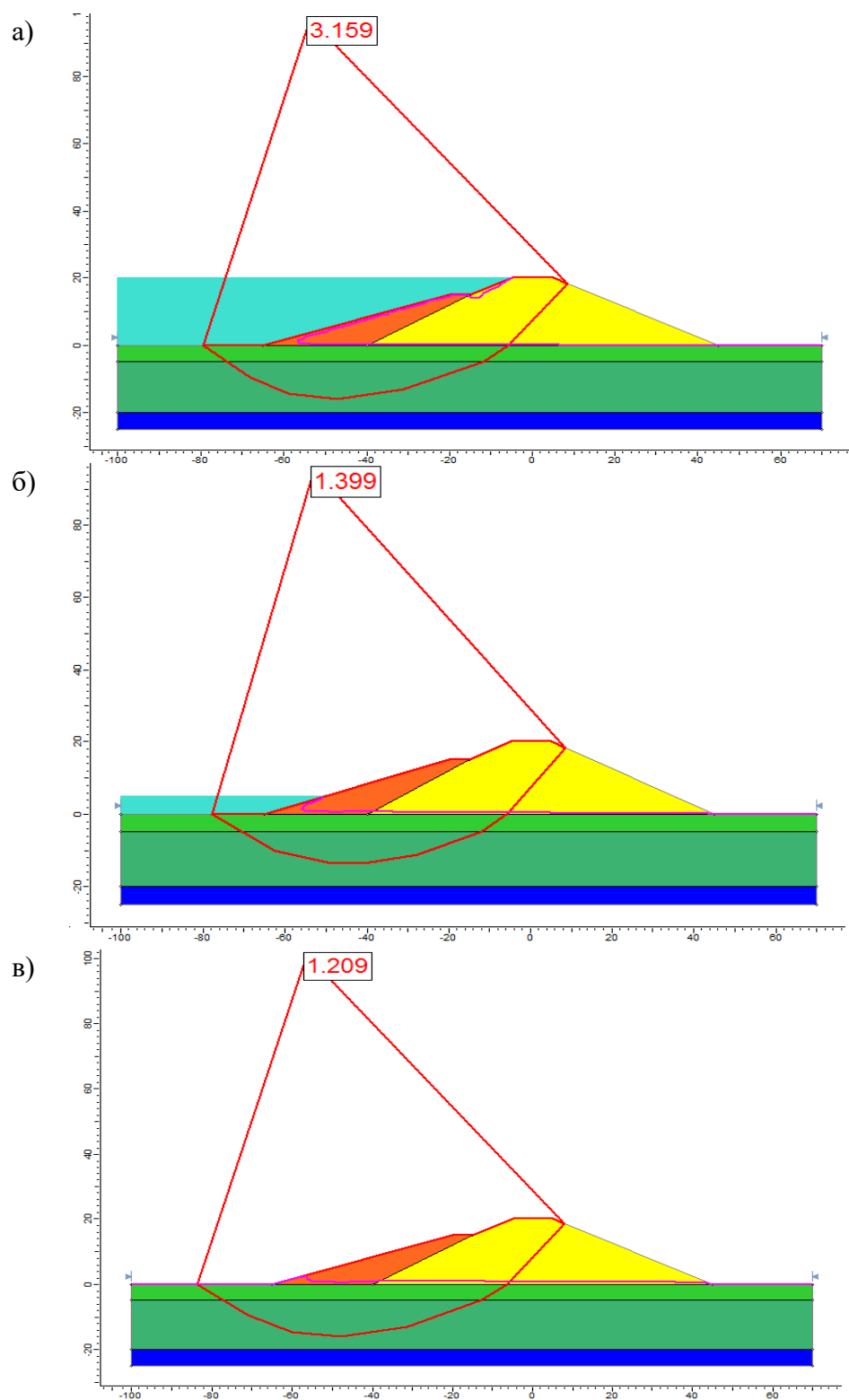


Рисунок 4.3. Поперечный разрез дамбы. Оценка устойчивости внешнего откоса дамбы при быстром снижении уровня воды в реке: а) при уровне воды на конечный период экстремальной паводка $K_y = 3,159$; б) при понижении уровня воды после паводка $K_y = 1,399$; в) при полной сработке уровня воды $K_y = 1,209$

Вертикальная дренажная система должна быть расположена за дамбой примерно в 30–50 м от внутреннего ее 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 [68, 110].

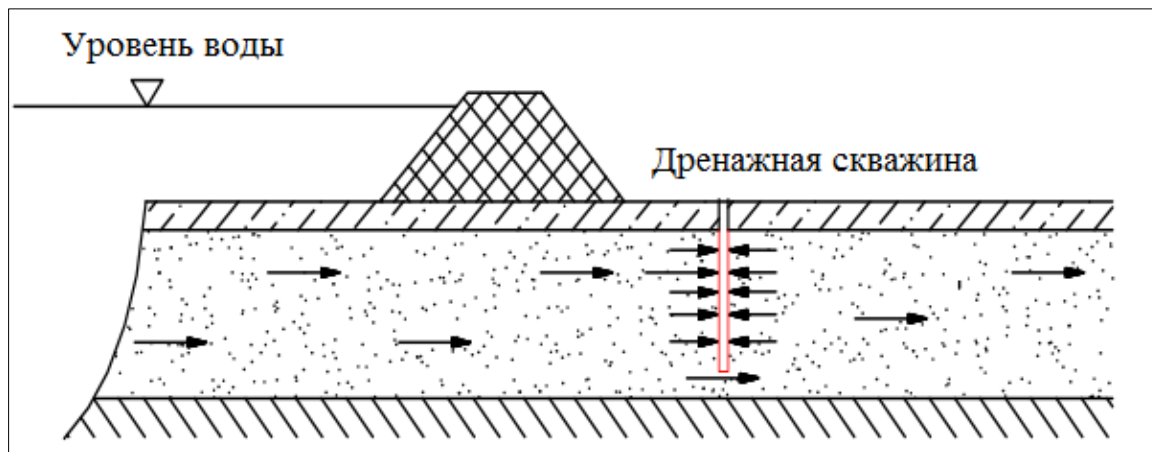


Рисунок 4.4. Схема расположения дренажной скважины

В результате использования скважинного дренажа давление фильтрационного потока в основании рядом с дамбой будет снижаться, поэтому оно будет оставаться устойчивым, другими словами, суффозионный процесс и пьвуны будут исключены. Однако эффективность этой меры зависит как от геологического строения основания дамбы, так и от проницаемости и состава частиц водоносного горизонта, химического состава подземных вод. Но, в целом, он является хорошей мерой, кроме того, ее преимущество – меньшая площадь, занимаемая при возведении в сравнении с другими защитными сооружениями.

В гидрогеологической литературе по этой области исследований сказано, что водоносные горизонты (q_h) и (q_p) имеют гидравлическую взаимосвязь с рекой, поэтому эти дренажные скважины можно комплексно использовать для водоснабжения города Ханой. Это повысит эффективность использования дренажных скважин и одновременно уменьшит кольматацию их фильтров. Поэтому эта одна из оптимальных мер для практического применения в области исследования.

Согласно оценке инженерно-геологических условий вдоль дамбы Красной реки в ее основании залегают песчаные слои (5-ый или 7-ой слой), имеющие гидравлическую связь с Красной рекой. По результатам моделирования устойчивости основания дамбы при повышении уровня воды в реке в сезон дождей, устойчивость основания дамбы Красной реки зависит от продолжительности паводка и мощности глинистого слоя. При изменении мощности глинистого слоя от 0 до 10 м, основание дамбы неустойчиво из-за фильтрационной деформации в основании дамбы. Причиной разрушения грунтов основания дамбы является процесс фильтрации в нем (раздел 3.6). Поэтому следует принять меры для снижения фильтрационного давления на основание дамбы для геологических типов структур: I–1; II–1; III–2. Как указано выше, предполагается, что дренажная скважина в основании дамбы является подходящим решением для снижения фильтрационного давления. В качестве доказательства результаты расчетной модели показаны на рисунке 4.5.

Коэффициент устойчивости внутреннего откоса и значение гидравлического градиента с течением времени при паводке в реке с применением дренажных скважин для снижения фильтрационного давления в основании дамбы показаны на рисунках 4.6 и 4.7. Согласно ним, при повышении уровня реки в течение 20 дней, основание дамбы остается устойчивым. Таким образом, эта защитная мера подходит для снижения фильтрационного давления и поддержания устойчивости дамбы.

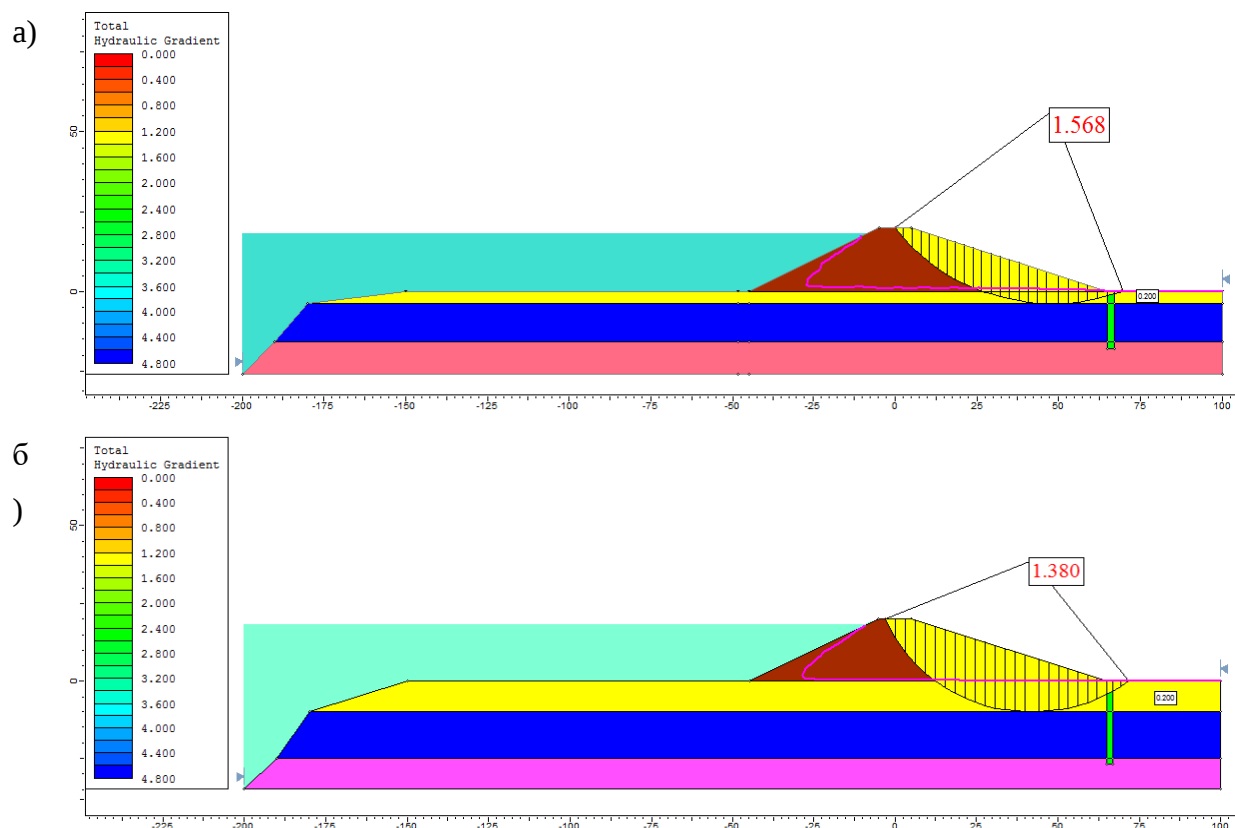


Рисунок 4.5. Модель расчета устойчивости внутреннего откоса дамб после установки дренажной скважины: а) при мощности глинистого грунта – 5 м; б) при мощности глинистого грунта – 10 м

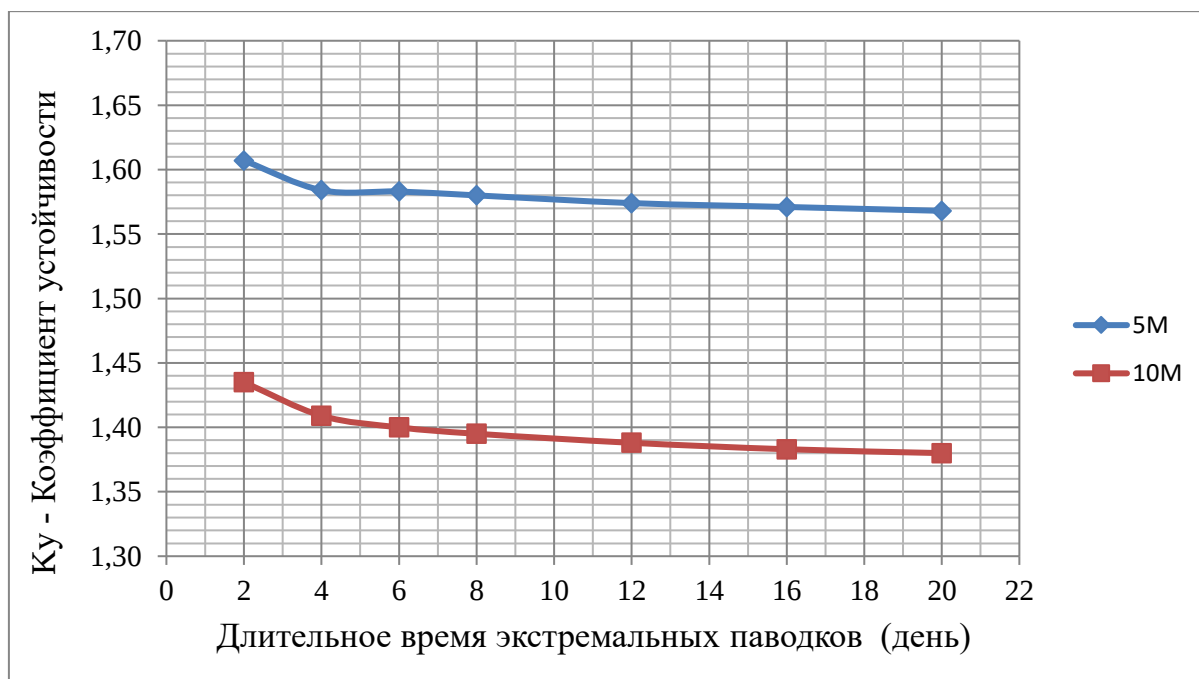


Рисунок 4.6. График зависимости коэффициента устойчивости внутреннего откоса дамб от продолжительности паводка при применении дренажных скважин при разных мощностях глинистого слоя

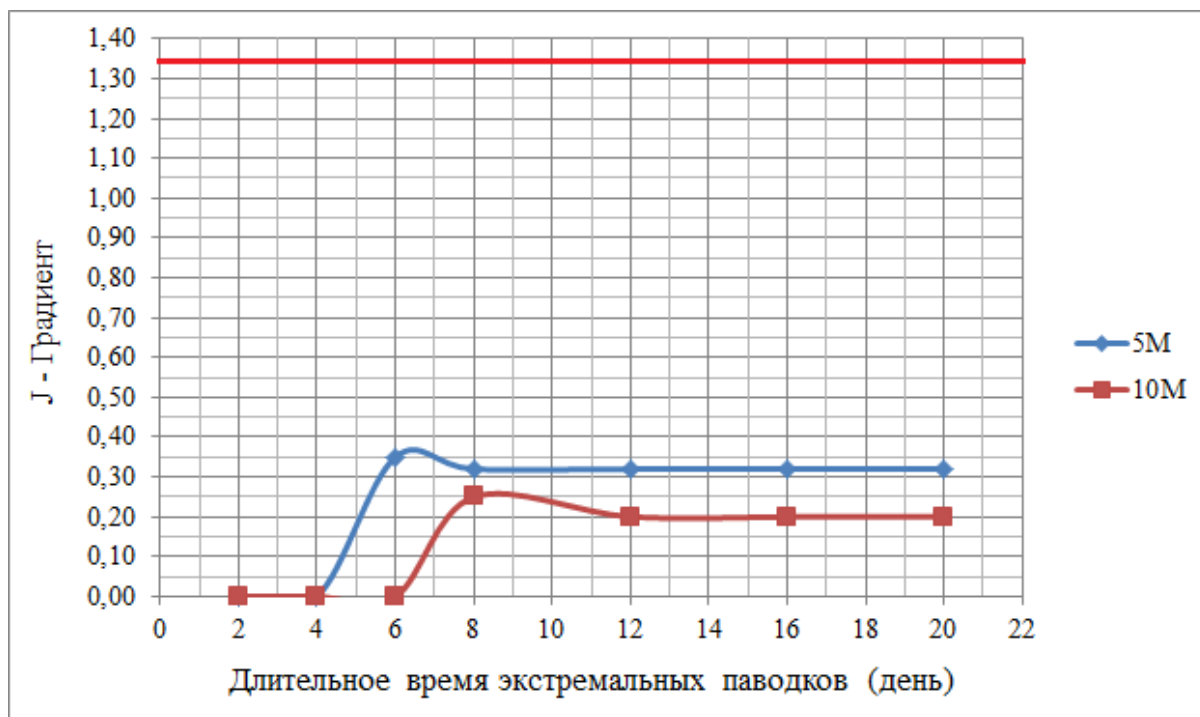


Рисунок 4.7. График зависимости гидравлического градиента в грунтах основания дамбы от продолжительности паводка при применении дренажных скважин (красная линия – критический градиент)

4.2. Создание защитных облицовок на берегах реки

Эрозия и возникающие вследствие нее оползни по естественным берегам 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 оползни берегов. Однако, эти меры также имеют определенные преимущества и недостатки. Среди них нужно выбрать самые подходящие для района исследования, с учетом геологических, гидрогеологических, тектонических условий, режима течения, топографических характеристик. Выбранная мера ограничит активизацию процессов эрозии и оползней берегов рек. Кроме того, при ее выборе также должны учитываться экономические затраты.

Как показано выше (подраздел 3.4.2), эрозия берегов рек возникает, когда уровень воды поднимается в сезон дождей, а затем быстро отступает. Сезонное колебание уровня реки приводит к изменению физико-механических свойств и состоянию грунтов берегов рек, поэтому коэффициент устойчивости K_y склона сильно уменьшается с 1,528 до 0,718. Следовательно, необходимы меры по повышению устойчивости склонов берегов.

На основе вышеприведенного анализа автор предлагает меры по стабилизации берегов рек путем создания защитных облицовок и расширения склона с целью уменьшения крутизны берега реки для его устойчивости [8]. Облицовка – это технологическое решение, в котором в качестве наружного покрытия используются устойчивые к механическому воздействию воды материалы, чтобы предотвратить эрозию берегов и защитить их склоны. Это технологическая мера, обычно используемая в разных странах мира для защиты берегов рек. Схема облицовки склона речного берега показана на рисунке 4.8. 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 связаны друг с другом в большой массив, охватывающий весь склон. Панели производят из сборных железобетонных плит. Эта мера имеет ряд преимуществ: простота конструкции, быстрое время монтажа, высокая устойчивость к воздействию водного потока. Поэтому, данная мера подходит для повышения устойчивости склонов берегов реки на исследуемой территории.

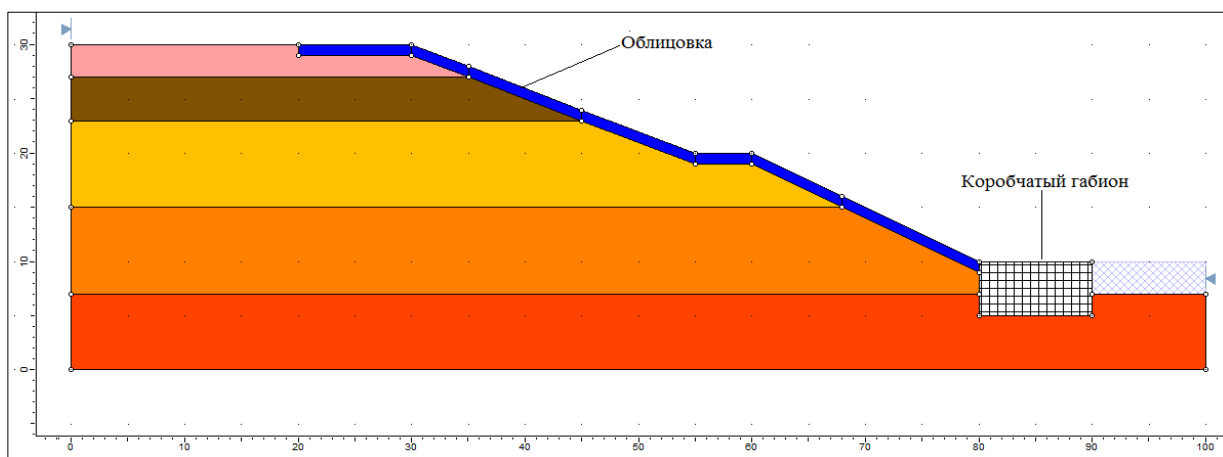


Рисунок 4.8. Схема укрепления склона берега р. Красной с помощью габионов и железобетонной облицовки

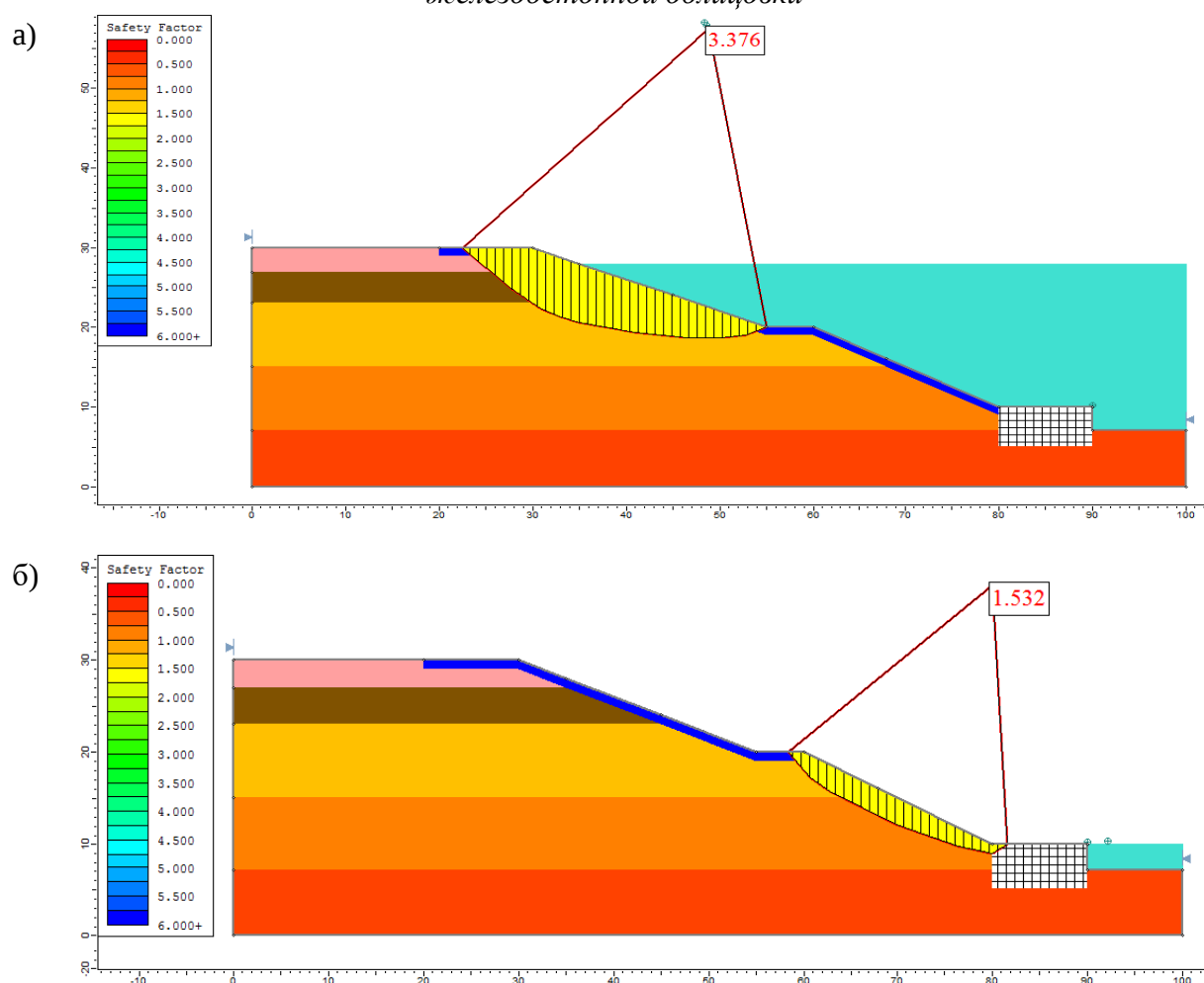


Рисунок 4.9. Коэффициент устойчивости откоса берега реки при изменении уровня паводковых вод после берегоукрепления: а) Коэффициент устойчивости на пике наводнения; б) Коэффициент устойчивости после быстрого спада воды

Анализ рисунков 3.7 и 4.9 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.

4.3. 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 (раздел 3.7), приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Общие результаты расчета осадки дамбы

Этап	Высота дамбы, (м)	Типы геологического строения основания дамбы							
		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

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 длительного времени, грунты основания также консолидировались постепенно. Однако, неравномерная осадка дамбы является основной причиной, вызывающей трещины на ее поверхности.

Для восстановления высоты дамбы и выравнивания ее поверхности, по которой во многих местах проложены дороги, автором предлагается мера по подсыпке грунтовых материалов до проектной отметки +20 м [33]. Компенсационная подсыпка дамбы соответствует величине осадки и нивелирует дефекты, обусловленные геологическим строением (табл. 4.2).

При компенсационной подсыпке грунтов равной 30 см для типа сферы взаимодействия 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. 4.2 и рис. 4.10).

Таблица 4.2

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

Аналогично вышесказанному, для остальных типов геологических разрезов, результаты расчета осадки и компенсационной подсыпки грунтов основания дамбы по методу конечных элементов представлены в таблице 4.2.

Расчетные результаты для типов геологических разрезов (табл. 4.2) показывают, что осадка основания после компенсационной подсыпки на поверхности дамбы (H_1) очень мала и соответствует осадке основания на конечном этапе. Поэтому компенсационная грунтовая подсыпка для дамбы (H_2) должна доводить высоту гребня дамбы повсеместно до отметки 20,0 м. Расчетные результаты с данной компенсационной подсыпкой показывают, что основание дамбы не даст дополнительную деформацию при выведении гребня на проектную отметку, и трещины из-за неравномерной осадки основания на поверхности дамбы не появятся.

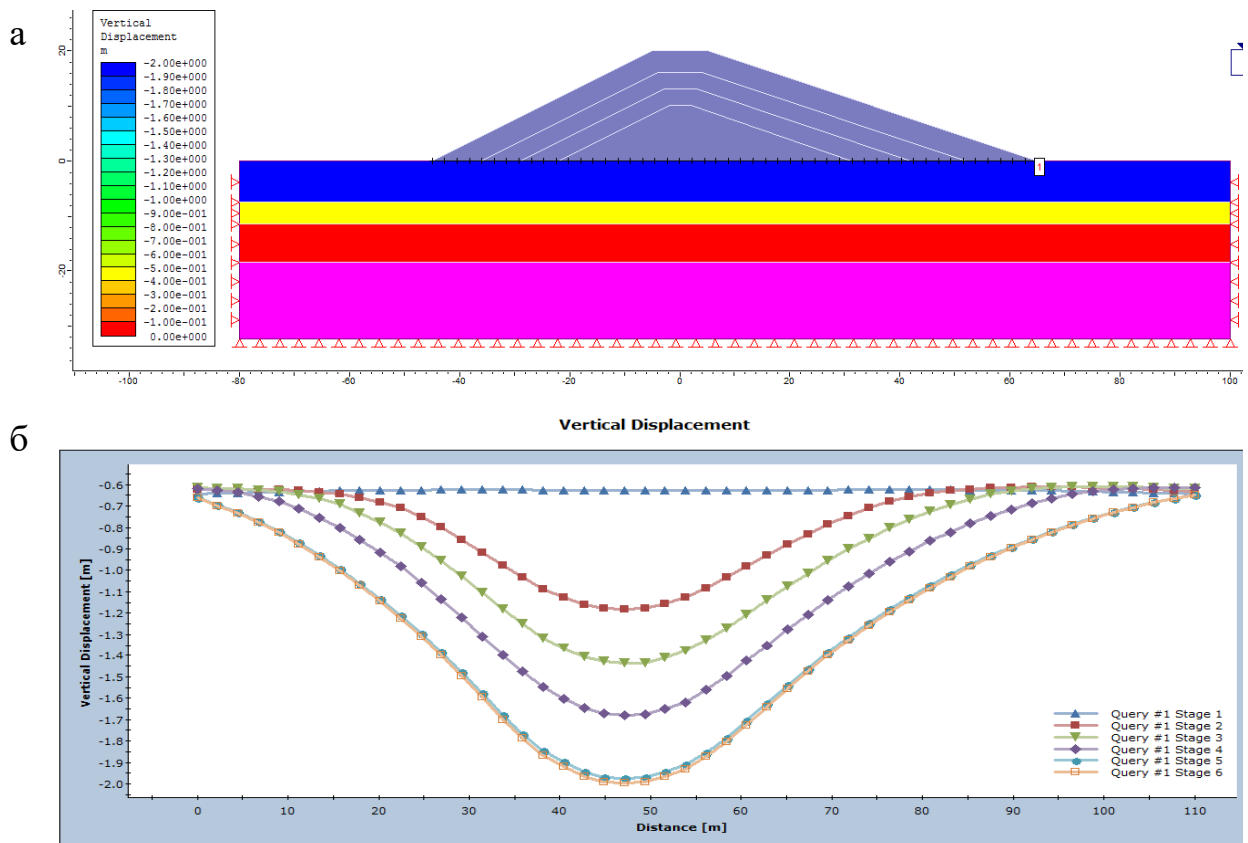


Рисунок 4.10. Модель и результат расчета осадки для типа сферы взаимодействия I–1, при компенсационной подсыпке в поверхности дамбы – 30 см: а) модель расчета; б) результат расчета

Выводы

1. Анализ и расчеты показали, что для обеспечения устойчивости в процессе эксплуатации дамбы и берегов р. Красной в Ханое применимы такие решения, как: расширение и выполаживание насыпи откоса дамб, вертикальный дренаж, компенсационная подсыпка гребня дамбы и облицовка берегов рек. Это оптимальные меры, применяемые к области исследования.

2. Эффективность технических мероприятий для повышения устойчивости дамб зависит от геологических и топографических условий. Для каждого конкретного участка дамбы можно использовать отдельную меру или комбинацию из нескольких для повышения устойчивости дамбы.

3. Расчетами обоснованы следующие меры по повышению устойчивости дамбы:

+ Для внешнего откоса рекомендуется расширение и выполаживание, что приведет к увеличению коэффициента устойчивости (K_y) с 0,920 до 1,209 и предотвратит дальнейшие деформации при любом развитии событий.

+ Для внутреннего откоса после расширения и монтажа системы линейного вертикального дренажа за дамбой видно, как коэффициент устойчивости (K_y) увеличивается с 0,89 до 1,174, что обеспечивает его длительную сохранность.

+ Для берегов реки укрепление склона сборными железобетонными плитами с габионами в основании приведет к увеличению коэффициента устойчивости (K_y) с 0,718 до 1,532.

+ После компенсационной подсыпки поверхности дамбы до проектной отметки +20,0 м в ее теле не появятся трещины из-за неравномерной осадки.

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 $K_y = 1,5$ на пике паводка, до $K_y = 0,7$ 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Опубликованная

1. Ананьев В.П., Передельский Л.В. Инженерная геология и гидрогеология. – М.: «Высшая школа», 1980. – 272 с.
2. Бабич Д.Б., Иванов В.В., Коротаев В.Н. Размывы речных берегов как негативные проявления русловых процессов // Геориск. 2016. № 3. С. 38–48.
3. Барац Н.И. Механика грунтов: Учебное пособие. – Омск: Изд-во СиБАДИ, 2008. – 106 с.
4. Большая энциклопедия Вьетнамской истории. – Ханой: Ханойский музей истории. 1993. 1263 с. (На вьетнамском языке).
5. Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.А. Инженерная геодинамика. – М.: Изд-во КДУ, 2015. – 472 с.
6. Варнс Д. Движение склонов, типы и процессы. Оползни, исследование и укрепление. – М.: Мир, 1981. С. 32–85.
7. ВСН 04-71. Указания по расчету устойчивости земляных откосов. Изд. 2-е. – Л.; «Энергия», Ленинградское отделение. 1971. 104 с.
8. ВСН-АПК 2.30.05.001-2003. Мелиорация. Руководство по защите земель, нарушенных водной эрозией. Габионные конструкции противозэрозионных сооружений. Министерство сельского хозяйства российской федерации. Москва. 2003.
9. Ву В.Ф. Ханой: геология, геоморфология и природные ресурсы: монография / Ву Ван Фаи. – Ханой: Ханойское издательство, 2011. – 280 с. (На вьетнамском языке).
10. Ву К.М., Чйнь К.Х. Некоторые оценки изменения геологической среды вдоль рек Ханоя, связанные с опасными геологическими процессами в районе дамбы. //Сборник научных докладов национальной экологической конференции, Ханой. 2004. № 45. С. 68–72. (На вьетнамском языке).

11. Ву Т.Й. Исследовательская модель изменения русла Красной реки от Сонтай до Ханой. // Ханой: Конференция «Геология – 06», 1995. С. 94–99. (На вьетнамском языке).
12. Гинко С.С. Катастрофы на берегах рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1997. 128 с.
13. Динь Т.Х., Фоменко И.К., Вязкова О.Е., Сироткина О.Н. Исследование влияния экстремальных паводков на устойчивость защитных дамб (на примере г. Ханой). //Инженерные изыскания. Том XII. № 11-12/2018. С. 26–34.
14. Доан Т.Т. Оценка экологических, геотехнических условий и предложение разумных методов планирования землепользования для динамической зоны вдоль Красной реки в города Ханой. //Сборник докладов на строительной научно-технической конференции. Ханой: строительный научно-технический институт, 2006. С. 175–183. (На вьетнамском языке).
15. Истомина В.С. Фильтрационная устойчивость грунтов. – М.: Госстройиздат, 1957.
16. Као Д.Д. Оценка скорости эрозии берега Красной реки на основе количества осадков в реке. // Доклад на научной конференции: «Оценка воздействия эрозионных процессов в берегу Красной реки». – Ханой: Ханойский институт ирригационных наук, 2000. С. 93–100. (На вьетнамском языке).
17. Климентов П.П., Кононов В.М. Динамика подземных вод. – М.: «Высшая школа», 1985. – 384 с.
18. Ле В.Т. Устойчивость дамб в северной дельте Вьетнама. //Сборник результатов исследований механики грунтов и основания. Ханой: Научно-гидрогеологический Ханойский институт. 1979. № 16/10. С. 24–32. (На вьетнамском языке).
19. Ле Ч.Т. Некоторые результаты численного моделирования динамических процессов, происходящих в районе дамбы. //

- Национальный инженерно-геологический журнал, 12/2003. № 2. С. 26–38. (На вьетнамском языке).
20. Лебедев А.Ф. О природе истинных пlyingунов //«Москвaвологострой». 1935. № 3, С. 29–34.
 21. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология – Инженерная геодинамика. – Ленинград: «НЕДРА», Ленинградское отделение, 1977. – 479 с.
 22. Маслов Н.Н. Условия устойчивости водонасыщенных песков. – М.: Госэнергоиздат, 1959. 327 с.
 23. Мечников Л.И. Цивилизация и великие исторические реки – М.: Прогресс-Пангея, 1995. – 462 с.
 24. Нгуен Д.Д. Выветривание и эрозия берега Красной реки. // Доклад на научной конференции «Оценка воздействия эрозионных процессов в берегу Красной реки». Ханой: Ханойский институт ирригационных наук, 2000. С. 66–74. (На вьетнамском языке).
 25. Нгуен Ч.Й. Основные характеристики современной геодинамики на территории Северного Вьетнама. // Геология и окружающая среда № 4, 1991. С. 10–20. (На вьетнамском языке.).
 26. Нгуен Х.Д. Инженерная геология и гидрогеология [Книга]. Ханой, 2010. С. 203. (На вьетнамском языке).
 27. Нгуен Х.Д. Исследование и синтез причин растрескивания дамбы речного берега в районе около Ханоя. // Сборник докладов на строительной научно-технической конференции. Ханой: Геологический институт Ханой, 2002. С. 102–109. (На вьетнамском языке).
 28. Нгуен Ч.И. Прогноз появления новейших тектонических трещин в г. Ханое / Нгуен Чонг Ием // Геология Вьетнама. 1991. № 202. С. 17–19. (На вьетнамском языке).
 29. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности – М.: ЛЕНАНД, 2015. – 320 с.
 30. Пономарева И.Н., Мордвинов В.А. Подземная гидромеханика: Учебное пособие. – Пермь, Перм. гос. техн. ун-т, 2009. – 103 с.

31. Сироткина О.Н., Фоменко И.К., Горобцов Д.Н. О классификации математических методов оценки локальной оползневой опасности // Сборник научных трудов по материалам II международной научной конференции «Наука России: цели и задачи». – т. 2. – Екатеринбург: НИЦ L-журнал, 2017. – С. 50–55.
32. СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений. Москва. 2011.
33. СНиП 22. 262 – 2000. Нормативы обследования и проектирования грунтовых дорожных насыпей на слабых грунтах. Ханой, 2000. (На вьетнамском языке).
34. СП 23.13330.2018 «СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений». Издание официальное. Москва. 2018.
35. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике – М.: Госстройиздат, 1958. – 608 с.
36. То Ц.В. Исследование процесса разрушения из-за фильтрации в основании дамб р. Красной по экспериментальной модели. //Труды 14-й научной конференции. Ханой: Горно-геологический Ханойский университет, 11/200. С. 36–39. (На вьетнамском языке).
37. То Ц.В. Выделение структур основания правого берега р. Красной в Ханое. // Сельское хозяйство и развитие села. 2/2002. № 14, С. 149–151. (На вьетнамском языке).
38. Тхинь Ф.Х., Строкова Л.А., Минь Н.Н. Оценка и прогноз оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод в городе Ханой //Инженерная геология. 2012. № 2. С. 46–53.
39. Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В., Тер-Мартirosян З.Г., Чернышев С.Н. Механика грунтов, основания и фундаменты. – М.: «Высшая школа», 2007. С. 566.
40. Фам Д. Результаты исследований физических моделей мер защиты побережья от эрозии в районе Фугия Ханоя // Сборник результатов научно-технических исследований в период 1994-1999 гг. Ханой:

Научно-гидрогеологический Ханойский институт, 1999. С. 188–198. (На вьетнамском языке).

41. Фам Х.Т. О типах эрозии берега Красной реки. // Сборник докладов на научной конференции «Оценка воздействия эрозионных процессов в берегу Красной реки». Ханой: Ханойский институт ирригационных наук, 2000. С. 106–114. (На вьетнамском языке).
42. Фам Н.Х. Метод конечных элементов [Книга]. – Ханой: Гидротехнический университет, 1998. – 212 с. (На вьетнамском языке).
43. Фам Т.Ц. Оползневая опасность берега реки в месте слияния рек Тао–Да–Ло. // Наука о Земле. 2012. № 3. С. 18–26. (На вьетнамском языке).
44. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Опасные геологические процессы на территории г. Ханой (Вьетнам)//Вестник Томского государственного университета. 2011. № 349. С. 200–204.
45. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Причины оседания земной поверхности в Ханое //Разведка и охрана недр. 2012. № 12. С. 30–33.
46. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Слабые грунты на территории города Ханой (Вьетнам) // Инженерная геология. 2014. № 1. С. 30–39.
47. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Сравнение методов прогноза оседания земной поверхности в связи с извлечением подземных вод в г. Ханое (Вьетнам) // Геотехника. 2014. № 1–2. С. 18–35.
48. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Оценка и прогноз оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод в городе Ханой (Вьетнам) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2014. № 2. С. 169–178.
49. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Карты прогноза оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод в городе Ханое (Вьетнам) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2016. № 6. С. 543–556.
50. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Типизация грунтовых толщ территории города Ханой (Вьетнам) при изучении оседания земной поверхности при

- водопонижении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Том 328. № 4 . 2017. С. 6–17.
51. Фоменко И.К. Современные тенденции в расчетах устойчивости склонов // Инженерная геология. – 2012. – № 6. – С. 44–53.
52. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов – М.: Издательство ГЕОС. 2003. – 216 с.
53. Чалов Р.С. Почему размываются берега реки. //Соросовский образовательный журнал. Т. 6. № 2. 2000. С. 99–106.
54. Чан В.Т. Изучение и оценка инженерно-геологических условий и прогнозирование опасных геологических процессов вдоль дамбы Красной реки в центре Ханоя. // Геология, 2012. № 136, С. 90–100. (На вьетнамском языке).
55. Чан В.Т. Инциденты, связанные с деформацией дамбы из-за фильтрации в правом берегу Красной реки районе Фуктхо в провинции Хатай. //Геология, серия А, 2002. № 267, 11-12/2001. С.113–126. (На вьетнамском языке).
56. Чан В.Т. Характер грунтовых слоев в основании дамбы и явления фильтрации в её основании и берегах Красной реки на участке Фуктхо и Данфьюнг. // Наука о Земле. 2013. № 4. С. 544–550. (На вьетнамском языке).
57. Чан В.Т. Четвертичная геология и явления эрозии берега Красной реки на интервале Вьетчи – Данфьюнг. // Геология. 2013. № 267. С. 77–83. (На вьетнамском языке).
58. Чан В.Т., Ву К.М. Математическая модель оценки инфильтрационного давления грунтовых вод, влияющих на основание дамбы Красной реки в Ханое. // Наука о Земле. 2014. № 4. С. 240–250. (На вьетнамском языке).
59. Чан В.Т., Ву К.М. Оценка давления подземных вод на подошву дамбы Красной реки по системе манометров. // Наука о Земле. 2014. № 6. С. 102–110. (На вьетнамском языке).

60. Чан Ч.К. Вьетнамская история. – Ханой: Изд-во «Образование Вьетнама», 1995. 656 с. (На вьетнамском языке).
61. Чан Т.Х. Исследование, оценка и обобщение типов геологических опасностей на территории Вьетнама и профилактических методов. // Сборник докладов на научной конференции: «Геологические опасности на территории северных провинций Вьетнама». Ханой: Институт геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий, 2004. С. 125–134. (На вьетнамском языке).
62. Allsop W. et al, 2007. Failure mechanisms for flood defense structures. Flood Risk Management – Research and Practice, pp. 693–702.
63. Babu G.L.S. and Mukesh, M.D. (2004). Effect of soil variability on reliability of soil slopes. Geotechnique, 54(5): 335–337.
64. Ben Kiernan. Việt Nam: a history from earliest time to the present [book]. Oxford University Press., 2019. 656 p. ISBN 978-0-190-05379-6.
65. Bligh W.G., Dams and Weirs. Chicago: American Technical Society [book]. 1915. 206 p.
66. Cho S.E. (2007). Effects of spatial variability of soil properties on slope stability. Engineering Geology, 92: 97–109.
67. Cho S.E. (2010). Probabilistic assessment of slope stability that considers the spatial variability of soil properties. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136(7): 975–984.
68. Corps of Engineers, 1970. Engineering and Design Stability of Earth and Rock-fill Dams. Engineering Manual 1110-2-1902, Department of the US Army.
69. Deltacommissie. “Working together with water: A living land builds for its future.” Internet: http://www.deltacommissie.com/doc/deltareport_full.pdf, Dec, 25, 2017.
70. Duncan J.M., Wright S.G., Brandon T.L., 2014. Soil Strength and Slope Stability, 2nd edition. John Wiley and Sons, New Jersey.

71. Duncan J.M., Wright S.G., Wong K.S., 1990. Slope Stability during Rapid Drawdown. H. Bolton Seed Memorial 10. Symposium, Vol. 2, pp. 253–272.
72. Duong T.T., 2005. Hanoi land subsidence with reference to development of a proper monitoring network: master thesis in Engineering geology, Bangkok, 124 p.
73. Duong T.T., Vu C.M., Doan V.T., 2010. Land subsidence hazard due to karst in Vietnam and mitigation measures. Proceedings of the international symposium Hanoi geoengineering 2010. Hanoi, Vietnam National University, pp. 267–273.
74. DWW, Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Flood Risks and Safety in the Netherlands (Floris), Floris study - Full report, ISBN 90-369-5604-9, Delf, 2005.
75. El-Ramly, H. (2001). Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: Bridging theory and practice. Ph.D. thesis, University of Alberta, Edmonton, Alta.
76. Engineering and design. Design and construction of levees. U.S. Engineering manual 1110-2-1913, 2000. 164 p.
77. Engineering and design. Seepage analysis and control for dams. Engineer manual, № 1110-2-1901, 1993. 392 p.
78. Fenton, G.A., and Griffiths, D.V. (2008). Risk assessment in geotechnical engineering (Vol. 461). New York: John Wiley & Sons.
79. Fomenko I.K., Kurguzov K.V., Zerkal O.V. and Sirotkina O.N., 2019. Setting soil strength parameters for slope stability calculations. Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, Vol. 2 of *Proceedings in Earth and geosciences*, CRC Press/Balkema Leiden, The Netherlands, pp. 59–64.
80. GEO-SLOPE International Ltd. 2013. Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W. An Engineering Methodology. Calgary, Alberta, Canada.

81. GEO-SLOPE International Ltd. 2015. Stability modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology: First Edition, Revision 1. Calgary, Alberta: 396 pp.
82. GEO-SLOPE International Ltd., 2012. Seepage Modeling with SEEP/W. An Engineering Methodology. Calgary, Alberta, Canada, 207 pp.
83. Hong, H. and Roh, G. (2008). Reliability evaluation of earth slopes. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(12): 1700–1705.
84. Jak M., Kok M. (2000) A Database of Historical Flood Events in the Netherlands. In: Marsalek J., Watt W.E., Zeman E., Sieker F. (eds) *Flood Issues in Contemporary Water Management*. NATO Science Series (Series 2. Environment Security), vol 71. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4140-6_15.
85. Ji J., Liao H.J. and Low B.K. (2012). Modeling 2D spatial variation in slope reliability analysis using interpolated autocorrelations. *Computer and Geotechnics*, 40: 135–146.
86. Kanning W., 2012. The weakest link: Spatial variability in the piping failure mechanism of dikes. Doctoral thesis, Delft University of Technology, The Netherlands. <https://doi.org/10.4233/uuid:5fb7b121-dc00-48aa-bda2-b163f10513bf>
87. Kohno I. et al., 1987. Levee failure caused by seepage and preventive measures. *Natural disaster science*, Vol. 9, No. 2, pp. 55–76.
88. Lane E.W., 1935. Security from Under-seepage Masonry Dams on Earth Foundations. *Proceeding of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 100, pp. 1235–1272. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0004655>
89. Li D.Q., Qi X.H., Phoon K.K., Zhang L.M. and Zhou C.B. (2014). Effect of spatially variable shear strength parameters with linearly increasing mean trend on reliability of infinite slopes. *Structural Safety*, 49: 45–55.
90. Li K.S. and Lumb P. (1987). Probabilistic design of slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 24: 520–535.

91. Low B.K. (2003). Practical probabilistic slope stability analysis. Proceedings, Soil and Rock America 2003, 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and 39th U.S. Rock Mechanics Symposium, M.I.T., Cambridge, Massachusetts, June 22–26, 2003, Verlag Glückauf GmbH Essen, 2: 2777–2784.
92. Lowe J., Karafiath L., 1960. Stability of Earth Dams Upon Drawdown. Proceedings of 1st PanAm Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, Vol. 2, pp. 537–552.
93. Morgenstern N.R., Price V.E., 1965. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Geotechnique*, Vol. 15, pp. 79–93, <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>
94. Morgenstern N.R., Price V.E., 1967. A Numerical Method for Solving the Equations of Stability of General Slip Surfaces. *The Computer Journal*, Vol. 4, pp. 388–393, <https://doi.org/10.1093/comjnl/9.4.388>
95. Müller-Kirchenbauer H. et al., 1993. Mechanism for regressive erosion beneath dams and barrages, *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 369–376.
96. Pham Quang T., 2014. Reliability analysis of the Red River Dike system in Viet Nam. Doctoral thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, pp. 215, <https://doi.org/10.4233/uuid:852175ad-bcdc-4fe4-ae01-271f2405fd91>
97. River project Master Plan Mississippi and Illinois Rivers. Prepared by U.S. Army Corps of Engineers, St. Louis District 1222 Spruce Street St. Louis, Missouri 63101-2833, 2015. 444 p.
98. Rocscience Inc., 1998-2001. 2D finite element program for calculating stresses and estimating support around underground excavations. Phase2.
99. Schmertmann J.H., 2000. The No-Filter Factor of Safety against Piping through Sands. Judgment and innovation (eds F. Silva and E. Kavazanjian), ASCE Geotechnical Special Publication, No. 111, Reston, VA, USA: ASCE, pp. 65–132, <https://doi.org/10.1061/9780784405376.006>

100. Seed R.B. et al, 2005. Preliminary report on the performance of the New Orleans levee systems in Hurricane Katrina on August 29, 2005. Report No. UCB/CITRIS - 05/01.
101. Sellmeijer J.B., 1988. On the mechanism of piping under impervious structures. Doctoral thesis, Delft University of Technology, The Netherlands. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:7f3c5919-1b37-4de9-a552-1f6e900eeaad>
102. Stive M.J. et al. “The Netherlands: Challenges for the 21th century,” Institutional repository. Climate of Coastal Cooperation / R. Misdorp, Ed. Coastal & Marine Union-EUCC, 2011, pp. 1–10.
103. Taukenov T., Dzhanaleeva K., Yerzhanova Z., 2018. Methods of improving the efficiency of monitoring of channel deformations of mountain rivers near built-in settlements: on the example of the Buktyrma river. *Geodesy and cartography*, Vol. 44, No. 1, pp. 28–35. <https://doi.org/10.3846/gac.2018.260>.
104. Taylor Keith Weller. *A History of the Vietnamese* [book]. Cambridge University Press., 2013. 714 p. ISBN 978-0-521-87586-8.
105. Thi Phuong Quynh Le, Josette Garnier, Billen Gilles, Chau Van Minh. The changing flow regime and sediment load of the Red River, Viet Nam. *Journal of Hydrology* (2007) 334, 199– 214 pp.
106. Thomas F. Wolff. *Reliability of levee systems in Reliability-based design in geotechnical engineering* [book]. Taylor & Francis Group, New York, 2008, pp. 448–496.
107. Van Duivendijk, H., Van Westen, C.-J., Schultz B. *Dams and dikes in development: Proceedings of the Symposium, World Water Day, 22 March 2001*. A.A Balkema publisher, 2001. 98 p.
108. Vera van Beek. Observations on the process of backward erosion piping in small, medium and full-scale experiments. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Volume 15, 2011, 1115–1137 pp.
109. Vrijling J.K. et al., 2005. Criteria for acceptable risk in the Netherlands. *Infrastructure Risk Management Processes*, American Society of Civil Engineers, pp. 143–157.

110. Vrijling J.K. et al., 2011. Safety standards of flood defenses. Geotechnical Safety and Risk (ISGSR 2011), Germany, pp. 67–84.
111. Vrijling J.K. Implications of uncertainties on flood defence policy. Abstracts of the ISSH - Stochastic Hydraulics 2005, 23 and 24 May 2005 Nijmegen, The Netherlands. First published 2005. 350 p, pp. 155–157.
112. Wan C.F. and Fell R., 2004. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 4, pp. 373–380, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:4\(373\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:4(373)).
113. Wang Y., Cao Z.J. and Au S.K. (2011). Practical reliability analysis of slope stability by advanced Monte Carlo simulations in a spreadsheet. Canadian Geotechnical Journal, 48(1): 162–172.
114. Whitlow R., 1983. Basic soil mechanics. London.
115. Whitlow R., 1995. Basic soil mechanics – third edition. Longman Group Limited, 557 pp.
116. Wit J.M. de., 1984. Onderzoek zandmeevoerende wellen - rapportage modelproeven, Hydraulic Engineering Reports, Delft University of Technology, The Netherlands. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:2096342d-ac87-4395-8e18-9ec7b441fb69>.
117. Wit J.M. de. Onderzoek zandmeevoerende wellen - rapportage modelproeven, Rapport Grondmechanica Delft, 1984.
118. Wolff T.F., 1994. Evaluating the reliability of existing levees. Research report, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Michigan State University.

Фондовые материалы

119. Ван Д.Ч. Отчет «Изучение и определение участков оснований дамб со слабой геологической структурой в Северной Дельте». //Архив в Ханойском институте геологии, 1999. (На вьетнамском языке).

120. Данг К.Т. Исследование и оценка безопасности правобережной дамбы, проходящей через Ханой в контексте изменения климата: автореф. дисс. ... канд. геол.-минер. наук. /Данг Куок Туан. – Ханой. 2017. 30 с. (На вьетнамском языке).
121. Зоан Д.Л. История эволюции голоценовых отложений дельты Красной реки: дисс. ... канд. геол.-минер. наук / Зоан Динь Лам. – Ханой, 2002. – 122 с. (На вьетнамском языке).
122. Ле М.Х. Прогнозирование и предотвращение эрозии берега реки Меконг. Южный Геологический институт. Хошимин. 2001. С. 157. (На вьетнамском языке.).
123. Лыонг Ф.Х. Итоговый отчет по государственной научной теме «Исследование научно-технических решений для коррекции системы речной дамбы на ключевых точках в северных и южных равнинах» (код: КС.08.14/06–10.). Ханой: Институт геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий, 2010. 456 с. (На вьетнамском языке).
124. Нгуен Д.М. Инженерно-геологическое обеспечение освоения подземного пространства г. Ханоя (Вьетнам): автореф. дисс. ... канд. геол.-минер. наук: 25.00.08 / Нгуен Дык Мань. – СПб., 2010. – 24 с.
125. Нгуен Ч.Й. Отчет по программе государственного уровня 48.02 «Современные движения и активизация современной зоны разломов бассейна р. Красной». Архив национального научно-технического центра, Ханой, 1985. (На вьетнамском языке).
126. Нгуен Х.Д. Отчет «Оценка текущей ситуации и прогнозирование аварии на дамбе р. Красной в 2010 году». Ханой: Вьетнамский департамент управления дамбы, 2010 г. (На вьетнамском языке).
127. Сборник отчетов и геологических карт Вьетнама в 2000 году. Институт геологических наук Вьетнамской академии наук и технологии. Ханой, 2000 г. 268 с. (На вьетнамском языке).

128. Статистический отчет о ситуации с изменением климата в период 2000–2016 г. Ханой: Станция гидрометеорологической мониторинга Ханоя, 2016. 216 с. (На вьетнамском языке).
129. Статистический отчет о ситуации с эрозией Красной реки в период 1980–2000 гг. Ханой: Научно-исследовательский институт – морские инженерные науки, 2000. 168 с. (На вьетнамском языке).
130. Статистический отчет о ситуации с эрозией Красной реки в период 2005–2015 гг. Ханой: Научно-исследовательский институт – морские инженерные науки, 2015. 268 с. (На вьетнамском языке).
131. Статистический отчет по гидрологическим данным Красной реки за период 2000–2016 г. Ханой: Научно-исследовательский институт – гидротехнические науки, 2016. 198 с. (На вьетнамском языке).
132. То Ц.В.. Исследование оценки влияния характеристик проницаемости некоторых отложений на деформации дамбы (на примере участка дамбы Красной реки): автореф. дисс. ... канд. геол.-минер. наук. / То Суан Ву. Ханой. 2002. 30 с. (На вьетнамском языке).
133. Фам Х.Ц. Отчет «Реальная ситуация с эксплуатацией и использованием дамбы Красной реки в районе Ханоя в 2012 году». Ханой: Ханойский институт ирригационных наук, 2012. 356 с. (На вьетнамском языке).
134. Ха В.Х. Результаты расшифровки аэрофотоснимков г. Ханой. Отчет о научно-исследовательской работе. Ханой: Изд-во Ханойского государственного горно-геологического университета, 2004. – 55 с. (На вьетнамском языке).
135. Чан В. Отчет «Оценка устойчивости участка левого берега Красной реки в районе Донгань». Ханой: Ханойский геологический институт, 2001. – 215 с. (На вьетнамском языке).
136. Чан В.Т., Дао М.Д. Отчет «Изучение и оценка инженерно-геологических условий и прогноз опасных геологических процессов вдоль дамбы Красной реки в Ханое». Ханой: Ханойский геологический институт, 2012. – 265 с. (На вьетнамском языке).

137. Чан М.Л. Обоснование пространственно-временной структуры литомониторинга крупных городов (на примере города Ханоя): автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. Наук: 25.00.08 /Чан Мань Льеу. – М., 1993. 24 с.
138. Чан М.Л. Теоретические и методологические основы организации мониторинга литотехнической системы “городская агломерация”: дисс. ... д-ра геол.-минер. наук: 25.00.08 / Чан Мань Льеу. – М., 1998. 483 с.
139. Чинь К.Х. Отчет «Инженерно-геологическое обследование набережной в коммуне Хай Бой». Ханой: Ханойское отделение по управлению дамбой и предотвращению наводнений, 2002. 294 с. (На вьетнамском языке).