

процессов, г. Рязань, 3–7 октября 2022 г.: Доклады и сообщения. – М.: МГУ, 2022. – С. 128–130.

2. Агроскин, И. И. Гидравлика. 4-е изд. / И. И. Агроскин, И. И. Дмитриев, Ф. И. Пикалов. – М.–Л.: Энергия, 1964. – 352 с.

3. Штеренлихт, Д. В. Гидравлика / Д. В. Штеренлихт; ред. Н. М. Щербакова. – М.: Колос С, 2007. – 655 с.

4. Михневич, Э. И. Открытые водотоки: пропускная способность и устойчивость / Э. И. Михневич. – Минск: БНТУ, 2021. – 311 с.

УДК: 627.8

Разрушение грунтовых сооружений при насыщении их водой

Колосов М. А., Моргунов К. П., Чинаков П. П.

Государственный университет морского и речного флота

имени адмирала С. О. Макарова

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлен анализ причин обрушения и оползания склонов водохранилищ при их заполнении. Отмечено, что основным механизмом утраты грунтом несущей способности является разжижение грунта, происходящее при насыщении порового пространства водой и действии на частицы грунта взвешивающей архимедовой силы. Описан цикл лабораторных исследований, проведенных для оценки процесса насыщения водой и разрушения грунтовой дамбы. В результате эксперимента подтвержден процесс переукладки грунтовых частиц в теле дамбы, приведший к увеличению плотности грунтового массива.

Как показывают наблюдения за состоянием береговых откосов водохранилищ, зачастую при первичном их наполнении наблюдаются обрушения берегов. В частности, анализ повреждений береговых откосов и тела грунтовых плотин, выполненный в работе [1], подтвердил, что из рассмотренных восьмидесяти пяти случаев в девятнадцати наполнение водохранилища привело к разрушению тела плотины со стороны верхнего бьефа. При этом песчаные берега разрушаются с формированием пологих откосов, глинистые при размыве формируют временные вертикальные откосы, а скальные берега сохраняют форму скальных образований (рис. 1).

Как правило, основная причина таких разрушений – разжижение грунтов, вызывающее подмыв и обрушение слоев грунта. Значительное водонасыщение приводит к разрушению структурных связей в грунте в результате внешнего волнового воздействия, а также формирования фильтрационных потоков и суффозионного выноса в грунте.

Достаточно подробно описано обрушение берегов на водохранилище Вайонт (Италия, 1963 год) [2], где в результате оползня со склона горы породы заполнила водохранилище на высоту 170 м, произошел выплеск воды объемом около 50 млн. кубометров через арочную плотину, волна прошла вниз по долине, разрушая на своем пути населенные пункты, что привело к гибели около 2500 человек (рис. 2).



Рис. 1. Переформирование берегов водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС



Рис. 2. Водохранилище гидроузла Вайонт, заполненное оползнем

Подобными же причинами вызвана просадка здания Загорской ГАЭС-2 (Московская область). Здание станции было построено в сухом котловане. При заполнении в 2013 году нижнего бьефа станции водой и постановки здания под напор произошел перекося здания – правая его часть просела на 1,17 м, а левая поднялась на 0,22 м. Причины такой аварийной просадки проанализированы в работе [3] – здание Загорской ГАЭС-2 построено на высокопористых аллювиальных грунтах, при заполнении котлована и насыщении грунтов водой произошло разжижение грунта, что привело к резкому уменьшению сил внутреннего трения и как следствие, потере грунтом несущей способности.

По-видимому, подобными же причинами вызван прорыв дамбы обвалования канала имени Москвы между шлюзами № 7 и № 8 в 2019 году (рис. 3).

Подтопление и дальнейшее разжижение песчаной призмы в дамбе произошло из-за поступления воды по контакту «бетонное перекрытие туннеля – суглинок» – рис. 4. Полному водонасыщению призмы способствовало отсутствие контурного дренажа между плитой перекрытия туннеля и песчаной насыпью, то есть качественного дренирования (отвода воды) из дамбы организовано не было. Зимой откос дамбы с растительным грунтом и травой замерз, отток воды из призмы и ее испарение совсем прекратились, что привело к полному водонасыщению и разжижению грунта.



Рис. 3. Поступление воды из канала имени Москвы на Волоколамское шоссе

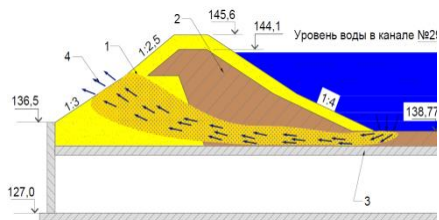


Рис. 4. Дамба ограждения канала:
 1 – песчаная упорная призма; 2 – экран из суглинка; 3 – перекрытие туннеля;
 4 – выход водогрунтовой смеси

Еще одним примером разжижения грунта является авария на плотине, строящейся Белопорожской малой ГЭС в Карелии в 2020 году. В состав мореного грунта, из которого формировалось тело плотины, входил и мелкофракционный пылеватый песок. В процессе наполнения водохранилища вода, поступающая из верхнего бьефа, привела к разжижению грунта, изменив его характеристики: увеличилась плотность грунта, что уменьшило пропуск воды в дренажную систему. В результате прорыв напорного сооружения произошел на участке, где слой разжиженного грунта близко подошел к низовому откосу [4].

Физическим смыслом процесса разжижения грунта является переход его в текучее состояние вследствие разрушения связей между частицами грунта.

Процесс разжижения состоит из трех стадий [5]:

- разрушение исходной структуры грунта вследствие разрыва структурных связей между частицами при силовом воздействии на массив грунта либо под действием взвешивающих (архимедовых) сил, при этом частицы грунта покидают свое первоначальное положение;

- стремление частиц грунта занять новое более устойчивое положение в дисперсной структуре массива, чему противодействует поровое давление в пространстве между частицами; грунт в виде потерявших связи частиц оказывается в разжиженном состоянии, при котором не происходит передачи нагрузки внутри массива и система частиц приобретает способность растекаться;

- происходит переукладка частиц при отжати воды, восстановление структуры и постепенное упрочнение (консолидация) грунта, время которого зависит от скорости отжата воды.

Как известно [5], несущая способность грунтовых оснований обусловлена наличием в грунтовом массиве сил трения и сцепления, определяемых формулой Кулона

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + C,$$

где τ – касательные напряжения в грунте, обеспечивающие его прочность и устойчивость; σ – нормальные напряжения в грунте, обусловленные весом; φ – угол внутреннего трения; C – сцепление в грунте.

При подтоплении вследствие действия сил взвешивания уменьшается нормальное напряжение и соответственно силы трения, а при наличии в грунтах глинистых включений уменьшается и сила сцепления.

Динамику обрушения крупнообломочных скальных насыпей на береговых склонах можно проиллюстрировать следующей схемой (рис. 5).

Скальные массивы сохраняют устойчивость за счет трения на контакте между отдельными камнями (обломками). При подтоплении откоса возникают силы взвешивания W , которые уменьшают вертикальную нагрузку G . При выполнении условия

$$P > (G - W) \operatorname{tg} \varphi,$$

происходит разрушение каменного откоса.

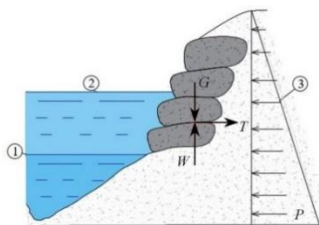


Рис. 5. Схема потери устойчивости склоновых крупнообломочных насыпей при подтоплении:

1 – исходный уровень воды; 2 – уровень заполнения в водохранилище; 3 – эпюра бокового давления грунтов; G – вертикальная нагрузка на контакте отдельных камней; T – сила трения на контакте; P – боковое давление грунта; W – сила взвешивания

Для изучения влияния архимедовых сил взвешивания и последующего уплотнения (переукладки) грунтовых частиц в гидротехнической лаборатории ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова были выполнены экспериментальные исследования. В лотке с прозрачными стенками формировалась насыпь, моделировавшая грунтовую плотину из различных материалов (камень, щебень, дресва). Схема и фотография установки приведены на рис. 6.

Заполнение установки проводилось из нижней части без формирования волн и значительных скоростей течения у грунтовой дамбы. Подтопление проводилось в два этапа.

1 этап – подъем уровня воды на 25 мм. Прозрачные стенки позволяли наблюдать процесс заполнения порового пространства и подъема уровня воды в грунте. Наблюдалось оплывание откосов, вынос мелких фракций из тела дамбы. Помимо этого, наблюдалось смещение мелких частиц вниз и переукладка (уплотнение структуры) более крупных частиц. Все это привело к просадке всего объема дамбы (рис. 7).

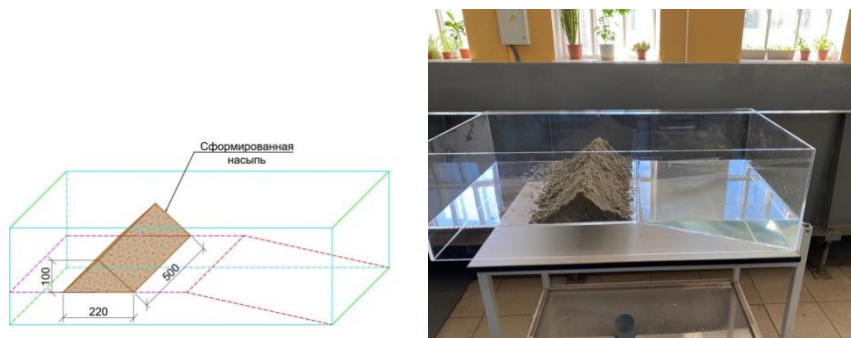


Рис. 6. Схема и фотография лабораторной установки (размеры в мм) до начала эксперимента

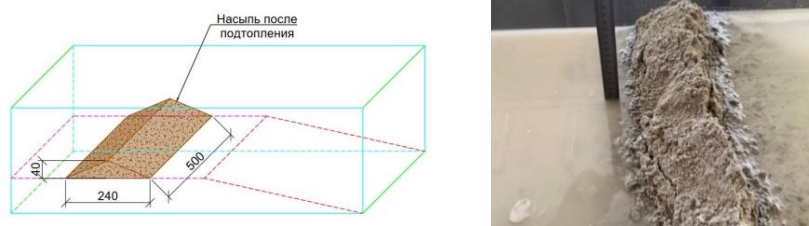


Рис. 7. Дамба после подтопления

2 этап – после окончания первичной просадки дамбы уровень воды был поднят до 40 мм. Деформации дамбы возобновились, и через некоторое время произошел прорыв потока в месте примыкания дамбы к стенке установки (рис 8).

В задачу исследований входило установление закономерностей и причин просадки каменных насыпей, которые наблюдаются при заполнении водохранилищ.

Просадки наблюдались в основном на верховом (напорном) откосе каменно-земляной плотины, в верховой упорной призме. Причиной просадок являлось нарушение контактов между частицами грунта при замачивании. При этом разрушения самих частиц не происходило, происходило только смещение и переупаковка частиц грунтового материала.

Как показали измерения плотности грунта дамбы в лабораторной установке, перед поступлением воды в лоток плотность укладки материала дамбы составляла $1,60 \text{ г/см}^3$, после подтопления плотность грунта составила $1,83 \text{ г/см}^3$.



Рис. 8. Прорыв дамбы с выносом грунта

Таким образом, опыт показал, что подъем воды и насыщение ею грунта дамбы вызывает перемещение частиц грунта. Насыпной грунт искусственной или природной насыпи имеет, как правило, потенциально неустойчивую структуру. При возникновении дополнительных сил, в частности, взвешивающих архимедовых сил, такие структуры деформируются или разрушаются, происходит их переукладка с формированием более плотной структуры. При наличии фильтрационных потоков со значительными скоростями движения воды возможно не только вертикальное смещение, но и

горизонтальные деформации (такие деформации наблюдаются при устройстве песчаных насыпей под дорожное полотно).

Лабораторные исследования, а также натурные наблюдения показывают, что причины оплывания и обрушения береговых откосов – это результат действия, в том числе, архимедовых сил взвешивания. При действии сил взвешивания на подтопленную часть берегового откоса изменяется напряжение в грунте, уменьшается трение в песчаных, скальных и крупнообломочных породах, происходит разжижение грунта, такое же, как и при динамических воздействиях.

Литература

1. Ходзе, Кодзи. Анализ причин аварий земляных плотин и методы контроля за фильтрацией / Кодзи Ходзе // ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева, перевод № 1765. – Л., 1982. – 52 с.

2. Моргунов, К. П. Проблемы разжижения грунтов в основаниях гидротехнических сооружений / К. П. Моргунов, М. А. Колосов // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 3. – С. 201–210.

3. Колосов, М. А. О причинах просадки основания строящейся Загорской ГАЭС-2 / М. А. Колосов, К. П. Моргунов, П. П. Чинаков // Фундаменты. – 2022. – № 1. – С. 38–39.

4. Колосов, М. А. О причинах прорывов напорного фронта в плотине Белопорожского гидроузла / М. А. Колосов, П. П. Чинаков, М. И. Заворовский, А. Ю. Симкин, А. С. Поздеев // Гидротехника. – 2022. – № 1. – С. 42–45.

5. Иванов, П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений / П. Л. Иванов. – Москва: Высшая школа, 1985. – 352 с.

УДК 726

Туркменское озеро «Алтын Асыр» в Туркменистане – грандиозный гидротехнический проект

Мыратбердиев Я., Джумадурдыев Т.
*Туркменский государственный архитектурно-строительный институт,
Ашгабат, Туркменистан.*

Туркменское озеро «Алтын Асыр» – грандиозный эко гидротехнический проект, направленный на оздоровление окружающей среды, рациональное использование водных и земельных ресурсов. Суть проекта – создание единой системы коллекторов для целенаправленного сбора дренажных вод с орошаемых земель во всех регионах страны и отвода их в гигантскую естественную впадину Гарашир на северо-западе Туркменистана.