

USING LIQUEFACTION AND CONSOLIDATION PROCESSES TO CONTROL SOIL PROPERTIES

K. P. Morgunov, M. A. Kolosov, P. P. Chinakov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

An analysis of the impact of water from streams and reservoirs on the banks of reservoirs and soil massifs of artificial embankments – dams, dikes, and embankments – was carried out. It has been determined that the main factor influencing the condition of banks and embankment soils is their saturation with water and the formation of filtration flows in soil massifs, sometimes with quite significant gradients. The main processes that determine the state of structures are the processes of loosening and liquefaction of soils and their subsequent consolidation. The processing of reservoir banks continues for periods of 5 to 10 years, while bank stabilization takes much longer – up to 30 years, and in some conditions does not stop at all. The processing of banks causes pollution of water bodies with both mineral particles and wood pulp. The nature of the locations of the reservoirs of power hydroelectric power plants and the measures taken to prepare the reservoir beds for flooding have led to the presence of a significant amount of floating wood in the reservoirs. It is noted that changes in soil properties, in particular, their bearing capacity, when saturated with water lead to non-design settlements of structures that are erected on such soils. Several examples of compaction of foundations of hydraulic structures by the flooding method are considered. Laboratory studies of the deformation of a soil embankment during the filling of a reservoir of the upper pool are described, the natural object for which was the earth dam of the Beloporozhskaya small hydroelectric power station. Filling of the upper pool of the laboratory installation led to deformation of the embankment and its breakthrough. As a result, the embankment structure settled, its soil compacted, and the backfill density increased from 0.801 g/cm³ to 1.830 g/cm³. It has been established that when an embankment is flooded, soil particles experience the action of several forces: their own weight, forces of mutual friction, buoyant Archimedes forces, and forces of hydrodynamic pressure. Under the action of the resultant of these forces, soil particles are rearranged into a denser packing, which increases the strength of the soil and its ability to withstand loads. It is recommended to use the flooding method to improve the properties of soils of embankments and foundations of hydraulic structures.

Keywords: coastal processes, coastal flooding, earth embankments, soil liquefaction, consolidation, filtration flows, biefs of hydraulic structure.

For citation:

Morgunov, Konstantin P., M. A. Kolosov and P. P. Chinakov “Using liquefaction and consolidation processes to control soil properties.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 21–32. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-21-32.

УДК: 624.131.431.1; 626.17; 627.43

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗЖИЖЕНИЯ И КОНСОЛИДАЦИИ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ГРУНТОВ

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

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Выполнен анализ воздействия водотоков и водоемов на берега водохранилищ и грунтовые массивы искусственных насыпных сооружений: плотин, дамб и насыпей. Определено, что основным фактором, влияющим на состояние берегов и грунтов насыпей, является насыщение их водой и формирование в массивах грунта фильтрационных потоков, порой с достаточно значительными градиентами, а основными процессами, определяющими состояние сооружений, служат процессы разуплотнения и разжижения грунтов и их последующей консолидации. Отмечается, что переработка берегов водохранилищ продолжается в течение 5–10 лет, стабилизация берега происходит гораздо дольше — до 30 лет, а в некоторых условиях вообще не прекращается. Подчеркивается, что переработка берегов вызывает загрязнение воды

водоемов как минеральными частицами, так и древесной массой, а характер местностей расположения водохранилищ энергетических гидроузлов и мероприятий по подготовке лож водохранилищ к затоплению обуславливает наличие значительного количества плавающей в них древесины. Отмечается, что изменение свойств грунтов (в частности, их несущей способности) при насыщении водой приводит к непроектным осадкам сооружений, возводимым на таких грунтах. Рассмотрено несколько примеров уплотнения оснований гидротехнических сооружений методом подтопления. Описаны лабораторные исследования деформации грунтовой насыпи при заполнении водохранилища верхнего бьефа, натурным объектом которых явилась грунтовая плотина Белопорожской МГЭС. Обращается внимание на то, что заполнение верхнего бьефа лабораторной установки привело к деформации насыпи и ее прорыву. В итоге осадок конструкции насыпи произошло уплотнение ее грунта и увеличение плотности засыпки с $0,801 \text{ г/см}^3$ до $1,830 \text{ г/см}^3$. Констатируется, что при подтоплении насыпи частицы грунта испытывают действие нескольких сил: собственного веса, сил взаимного трения, взвешивающих архимедовых сил и сил гидродинамического давления. Под действием равнодействующих этих сил происходит переукладка частиц грунта в более плотную упаковку, при которой повышается прочность грунта и его способность к восприятию нагрузок. Рекомендовано использовать метод подтопления для повышения свойств грунтов насыпей и оснований гидросооружений.

Ключевые слова: береговые процессы, подтапливание берегов, грунтовые насыпи, разжижение грунта, консолидация, фильтрационные потоки, бьефы гидроузлов.

Для цитирования:

К. П. Моргунов. Использование процессов разжижения и консолидации для регулирования свойств грунтов / К. П. Моргунов, М. А. Колосов, П. П. Чинаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 21–32. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-21-32. — EDN GCXADV.

Введение (Introduction)

В процессе строительства и последующей эксплуатации гидротехнических объектов происходит подтапливание, затапливание и размыв грунтовых сооружений: насыпей, дамб, берегов водохранилищ, а также откосов каналов и бьефов гидроузлов.

Берегом принято называть территорию, расположенную выше среднего меженного уровня воды в реке или выше нормального подпорного уровня воды в водохранилище, рельеф которой создан преимущественно (или подвергается коренному преобразованию) под влиянием водотока или водоема. Берега развиваются в неразрывной связи с их продолжением — подводным береговым склоном, представляющим собой прибрежную мелководную часть дна, где размещаются такие характерные формы рельефа, как прибрежная отмель и береговые аккумулятивные формы. Берег и подводный береговой склон образуют береговую зону.

К естественным береговым процессам относятся процессы, так или иначе участвующие в формировании берегов, которые представляют собой различные виды взаимодействия литосферы с гидросферой и атмосферой и характеризуются многообразием и взаимосвязанностью развития. К таким процессам относятся размывы берегов под действием ветровых и судовых волн, русловая и ветровая эрозии, процессы движения пород на склонах под влиянием гравитации, криогенные процессы, различные по генезису аккумулятивные процессы и др. При этом следует учитывать, что берега бьефов и водохранилищ зачастую сложены аллювиальными грунтами — мелкозернистыми и легко размываемыми. Кроме того, искусственные сооружения, возводимые в руслах или на берегах водных объектов, также подвержены воздействию водных потоков. Так, грунтовые насыпи широко применяются в дорожном и мелиоративном строительстве, плотины и дамбы — при формировании напорного фронта в энергетических и судоходных гидроузлах. В такие насыпные сооружения укладываются в основном песчаные материалы, каменная крошка и дробленая горная масса, состоящая из частиц различной крупности.

При заполнении водохранилищ повышается уровень подземных вод, и, следовательно, влажность пород, слагающих берега, увеличивается. В результате меняются физические свойства грунтов. Все это ведет к нарушению равновесия сил, обеспечивающего неподвижность склона. Его неустойчивость увеличивает колебания уровня водохранилища, вызывающие рез-

кие изменения давления грунтовых вод на породы, что приводит к оползням. При взаимодействии с водой в грунтовых массивах как естественных берегов, так и гидротехнических сооружений формируются фильтрационные процессы, сопровождающиеся суффозией, оплыванием и осадками массива, являющиеся, как правило, неравномерными. В грунтах основания и телах искусственных сооружений по окончании их строительства и при насыщении водой происходят процессы консолидации¹. Длительность процессов консолидации грунтов, находящихся в основании гидротехнических сооружений, которая определяется структурой этих грунтов, может быть довольно продолжительной [1], [2].

В статье приведены примеры улучшения прочностных свойств гидротехнических сооружений путем их предварительного затопления. Кроме того, для изучения поведения грунтового массива, из которого сложены гидротехнические сооружения, и изменения его характеристик при насыщении водой были выполнены лабораторные исследования, описанные в настоящей работе.

Задачей исследования является определение характера изменения свойств грунтов оснований и тела гидросооружений при их насыщении водой как в результате природных процессов, так и при специальном затоплении, оценка природы сил и процессов, происходящих при этом в грунтах, а также их влияние на прочностные и фильтрационные свойства конструкций.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Разрушение берегов ведет к отступлению береговой линии и формированию нового берегового профиля с более пологим откосом. При этом процесс изменения (разрушения) очертания берегов (абразия) особенно сильно проявляется на участках, где берега сложены лессовыми грунтами. Учет процессов, происходящих в грунтах как естественных береговых формирований водотоков и водоемов, так и грунтовых гидротехнических сооружений, при их насыщении фильтрующимися водами, необходим при разработке правил и условий эксплуатации этих объектов. Более того, порой предварительное искусственное водонасыщение (затопление) таких сооружений позволяет изменять их характеристики в нужном направлении, создавая благоприятные условия для последующей эксплуатации.

Переработка берегов происходит наиболее интенсивно непосредственно после заполнения, в первые годы эксплуатации водохранилищ, а затем постепенно затухает. Период активной переработки занимает обычно 5–10 лет, для стабилизации берега необходим период 20–30 лет [3]. Однако, например, на водохранилищах ГЭС Ангарского каскада, строительство которых было завершено в 1959–1974 гг., до настоящего времени продолжает активно формироваться береговая линия, интенсивно развиваются абразивные процессы, эрозионные и другие негативные геологические явления. Эти процессы не только не затухают, а, наоборот, увеличиваются их размеры и темпы развития.

Размыв берегов водохранилищ гидроузлов оказывает непосредственное влияние на окружающую природную среду. В результате размыва берегов вместе с обвалами грунтов в ложе водохранилищ попадает древесная масса с берегов. Ситуация осложняется тем, что, как показал анализ [3], [4], на стадии подготовки лож водохранилищ в России не было случая проведения лесосводки в полном запланированном объеме, а, например, в ложе водохранилищ Саяно-Шушенской и Красноярской ГЭС работы по лесосводке вообще не проводились. Объем плавающей древесины по Красноярскому водохранилищу составляет 0,104 млн м³, по Саяно-Шушенскому — 1,0 млн м³, по Братскому — 2,2 млн м³, по Усть-Илимскому — 0,9 млн м³ [4]. Несмотря на то, что в процессе очистки водоемов в среднем в год извлекается до 360 тыс. м³ плавающей древесной массы, ее объемы на акваториях водохранилищ не уменьшаются.

Изменение свойств грунтов, в частности, их несущей способности, при насыщении их водой приводит к непроектным осадкам сооружений, возведенных на таких грунтах. Например, известен случай просадки здания Загорской ГАЭС-2 при заполнении водохранилища нижнего бьефа [5]–[7]. Во избежание непроектных осадок насыпи в процессе строительства уплотняют, используя тяжелые

¹ Консолидация грунта — это замедленное уплотнение (повышение плотности) водонасыщенного грунтового слоя во времени, происходящее за счет выжимания воды и сближения грунтовых частиц под воздействием нагрузки.

катки, трамбовку и эффекты вибрации. Однако зачастую для уплотнения насыпей и улучшения их прочностных характеристик наиболее целесообразно проливать такой массив водой.

Результаты (Results)

Лабораторные исследования волнозащитной стенки Красноярского судоподъемника. Исследования изменения характеристик грунта при повышении его водонасыщенности были выполнены в процессе строительства Красноярского судоподъемника². Исследовалось формирование основания под бетонную волнозащитную стенку.

Волнозащитная стенка Красноярского судоподъемника расположена в верхнем бьефе гидроузла и предназначена для защиты верхового судовозного пути от волнения, она также служит основанием для металлических опор, удерживающих контактный провод, обеспечивающий подачу электроэнергии на судовую камеру (рис. 1).



Рис. 1. Волнозащитная стенка верхнего бьефа Красноярского гидроузла
(Фото заимствовано из открытых источников Интернета)

Стенка железобетонная, разрезная, из монолитных конструкций таврового сечения, состоит из 12 секций, отделенных от верхового опорного устоя поворотного устройства и друг от друга температурными и температурно-осадочными швами.

Основанием волнозащитной стенки служит с первой по седьмую секцию — банкет из уплотненной горной массы; с восьмой по двенадцатую секцию — скальное основание. Общая длина стенки равна 338,91 м; длина стенки на каменном банкете — 204,33 м; длина стенки на скальном основании — 134,58 м; высота стенки переменная (из-за переменных отметок подошвы) — от 7,5 м до 34,0 м. Насыпной банкет из разрыхленного каменного грунта выполнен на высоту 25 м. Стенка устроена на горизонтальной плите, которая опирается на каменную насыпь, уложенную на скальное основание. Материалы для устройства насыпи: камень 30 %, щебень и дресва 70 %³.

Для того, чтобы исключить неравномерные просадки стенки, перед ее возведением был выполнен комплекс мероприятий, а именно: послойная укладка грунта, укатка тяжелыми пневмокатками, а главное — подтопление уложенного грунта. Подтопление было выполнено, когда был завершен полный профиль отсыпки, возведена фундаментная плита и первая очередь волнозащитной стенки (50 % высоты). Подтопление привело к просадке материала на 450–500 мм. Для изучения процессов воздействия взвешивающих сил на грунтовый массив была выполнена серия опытов в лотке с прозрачной стеклянной стенкой (рис. 2).

В процессе проведения опыта осуществлялось подтопление образцов разнородных грунтов с подачей воды снизу вверх. Было установлено, что в разнородных и разнородных грунтах

² Колосов М. А. Лабораторные исследования просадочных свойств крупнообломочных материалов: сб. науч. трудов молодых специалистов. Л., ЛИВТ, 1973. Ч. III. С. 178–188.

³ Колосов М. А. Деформация банкета из крупнообломочного материала в основании волнозащитной стенки судоподъемника Красноярской ГЭС // Труды Гидропроекта. 1974. № 40. С. 199–208.

по мере подъема уровня воды в зоне подтопления идет непрерывный процесс переукладки частиц. При полном водонасыщении придонного слоя этот слой разжижается, и силы трения между частицами резко уменьшаются. Выше полностью разжиженного слоя находится также водонасыщенный слой, в котором под действием веса вышележащих массивов начинается процесс уплотнения — более мелкие частицы укладываются между крупными, в результате чего формируется слой более плотной укладки. Переукладка и уплотнение происходят также и в зоне разжижения [8].

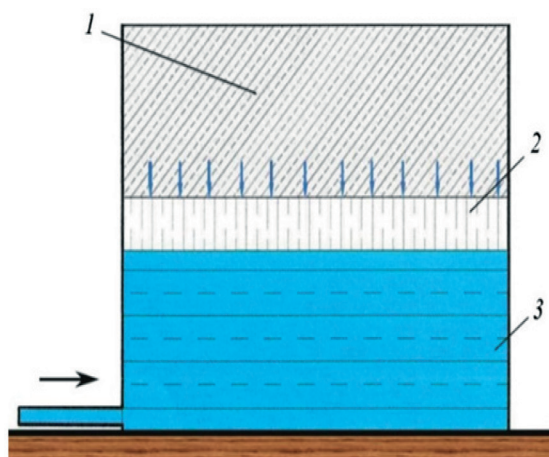


Рис. 2. Схема опыта разжижения грунтов в лотке со стеклянной стенкой:
1 — зона сухого грунта; 2 — зона переукладки частиц грунта под давлением сверху сухого грунта;
3 — зона разжижения грунта

Дальнейший подъем уровня воды приводит к последовательному уплотнению слоев грунта, при этом идет непрерывный процесс «Разжижение + сжатие с формированием более плотной укладки частиц грунта». При строительстве волнозащитной стенки Красноярского судоподъемника после подтопления насыпного основания его деформации стабилизировались, затем было надстроено тело стенки и верхняя плита. Дополнительные деформации при этом составили 50 мм (рис. 3).

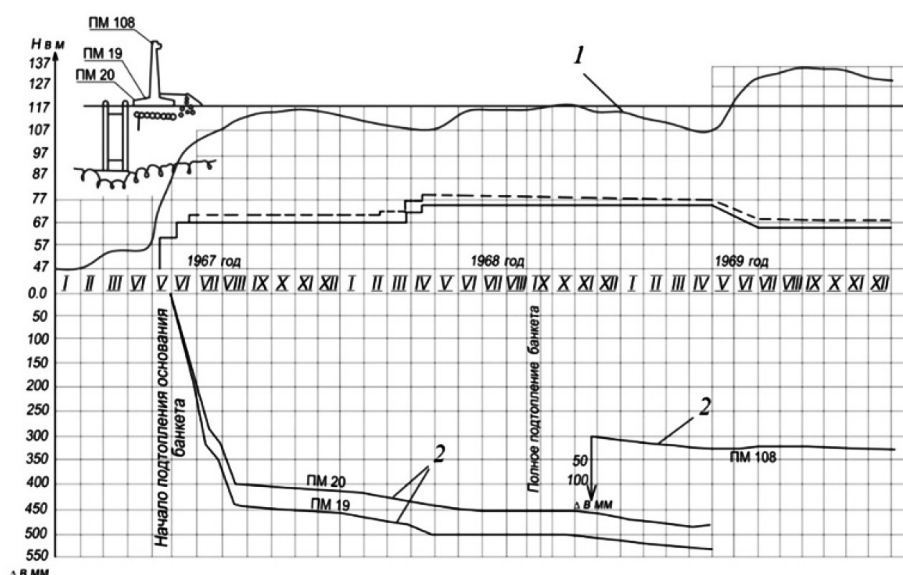


Рис. 3. График деформаций насыпного основания и волнозащитной стенки Красноярского гидроузла:
1 — уровень воды в верхнем бьефе;
2 — отметки поверхностных марок ПМ-19, ПМ-20, ПМ-108

Эти деформации не повлияли на состояние конструкций и напряжения в стенке, поскольку конструкция предусматривала устройство расширенных межсекционных швов шириной 15–50 мм.

Деформации при подтоплении защитной шпору гидроузла АЭС «Руппур». Метод подтопления грунтовой насыпи был использован при строительстве водозаборного узла АЭС «Руппур» (Республика Бангладеш). Строительство атомной электростанции ведет АО «Росатом», а гидротехнические объекты на р. Ганг для АЭС возводит российская компания АО «Оргэнергострой»⁴. Охлаждение элементов АЭС предусмотрено водой из р. Ганг, на которой для этого было устроено водозаборное сооружение (рис. 4).



Рис. 4. Водозаборное сооружение АЭС «Руппур»
(Фото заимствовано из открытых источников Интернета)

Защитная шпора водозабора представляет собой грунтовую насыпь из мелкофракционного песчаного грунта. Поперечное сечение насыпи устроено из двух ярусов (рис. 5).

Нижний ярус (в пределах от дна до рабочего уровня намывных песков). Укладка грунта выполнялась в воду. Для защиты от размыва песка предусмотрено устройство двух каменных насыпей, напорная грань которых, обращенная к намываемому песчаному материалу, покрыта фильтрующим иглопробивным геотекстилем.

Верхний ярус (в пределах от рабочего уровня до гребня сооружения). Возводился с послойной укладкой песка и уплотнением; толщина слоя 0,4–0,5 м, плотность укладки 1,52–1,59 т/м³, плотность скелета $\rho = 2,66$ г/м³, средняя пористость уложенного грунта $n = 0,4$.

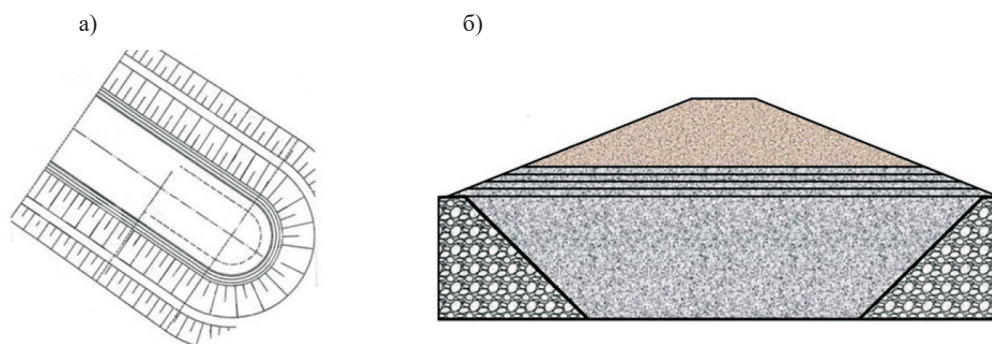


Рис. 5. Защитная дамба гидроузла «Руппур»:
а — план; б — поперечный разрез

Для достижения проектной пористости $n = 0,3$ необходимо было уплотнить песчаный грунт. По завершении работ по отсыпке грунта в половодье 2021 г. дамба была подтоплена. Это привело к локальным просадкам гребня и откосов дамбы и повреждению бетонного покрытия (трещины в бетоне).

⁴ <https://ioes.ru/ru/ob-ekty/gidrotekhnicheskie-sooruzheniya>.

Для локализации повреждений в бетонном покрытии рекомендовано было произвести подтопление «сухой» части шпоры посредством принудительной подачи воды на гребень сооружения, что и было выполнено. В результате произошли дальнейшие просадки гребня и откосов дамбы и консолидация ее грунтов. Затем трещины в покрытии дамбы были заделаны. Дальнейших деформаций дамбы на настоящий момент не зафиксировано.

Лабораторные исследования размыва плотины Белопорожской МГЭС. На русловой грунтовой плотине Белопорожской МГЭС-2 (р. Кемь, республика Карелия) в 2020 г. дважды произошёл прорыв грунтовой плотины [9] — рис. 6.

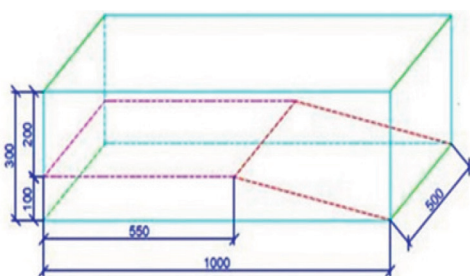


Рис. 6. Прорыв плотины Белопорожской МГЭС-2 24 октября 2020 г.
(Фото заимствовано из открытых источников Интернета)

Причиной этих аварий явился неучет изменения свойств грунта насыпи при его насыщении водой. Устойчивость плотины рассчитывалась с учетом физико-механических характеристик грунта по действующим нормам проектирования. Принятый в проекте коэффициент фильтрации должен был обеспечить фильтрационную прочность и устойчивость сооружения при отсыпке тела плотины из моренных грунтов. Тело плотины было выполнено без противофильтрационных элементов, дренаж тела плотины предусмотрен посредством объемных каменных призм, расположенных в верхнем и нижнем бьефах. Однако коэффициент фильтрации моренных грунтов, включающих мелкие фракции песка и пылеватые частицы, составляет в пределах 0,005–0,0003 м/сут. При таких значениях водоотдача в дренажные системы малоэффективна, что приводит к водонасыщению грунтового тела плотины. Кроме того, водоотдача снижается при некачественном выполнении дренажных призм (засорении посторонними грунтами). Насыщенный водой грунт плотины приобретает свойства «тяжелой» жидкости, происходят процессы разжижения, приводящие к потере устойчивости сооружения.

Для изучения и демонстрации этого процесса в гидротехнической лаборатории ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» были выполнены лабораторные исследования. Лабораторная установка представляла собой лоток с прозрачными стенками — рис. 7.

а)



б)



Рис. 7. Лабораторная установка по изучению подтопления грунта:

а — схема; б — внешний вид

Насыпь формировалась из грунта тела плотины Белопорожского гидроузла: мелко- и среднезернистого песка. Перед засыпкой лабораторным методом определялась исходная плотность грунта, которая составила $1,259 \text{ г/см}^3$. Насыпь формировалась без дополнительного уплотнения грунта, что соответствовало условиям формирования натурной плотины. Геометрические размеры насыпи в лабораторной установке составили: высота $h = 100 \text{ мм}$; ширина по основанию $a = 220 \text{ мм}$; ширина по гребню $b = 500 \text{ мм}$. Объем насыпи, имеющей форму призмы с треугольным основанием, определится в виде

$$V = \frac{1}{2}abh.$$

Зная общий вес насыпанного грунта, можно рассчитать его плотность в засыпке, которая оказалась равной $0,801 \text{ г/см}^3$. Сформированная в лабораторной установке насыпь подвергалась подтоплению со стороны верхнего бьефа с минимальным формированием волны, вода поступала в нижнюю часть установки и медленно поднималась, подтапливая нижнюю часть насыпи.

Подтопление производилось в два этапа. На первом этапе уровень воды перед насыпью подняли до 25 мм . При фильтрации воды через тело насыпи начались оплывание низового откоса и просадка массива грунта. Наблюдался вынос мелкофракционных частиц из тела насыпи в нижний бьеф. Деформации насыпи продолжались в течение некоторого периода времени (при проведении опыта — 14 мин), до формирования более устойчивой формы насыпи и окончания просадки. После окончания деформации откосов насыпи уровень воды в лотке был поднят до 40 мм , и деформации возобновились (рис. 8).



Рис. 8. Деформация насыпи
(уровень воды в верхнем бьефе 40 мм)

Через некоторое время (в опыте — 22 мин) после начала второго этапа произошел прорыв насыпи на участке ее примыкания в стенке установки (рис. 9). Деформация насыпи продолжилась до полного оплывания (в опыте — около 60 мин). По окончании оплывания насыпи воду из верхнего бьефа удалили. При этом уровень воды в нижнем бьефе сохранился, фильтрации через тело насыпи из нижнего бьефа в верхний практически не наблюдалось.



Рис. 9. Прорыв насыпи

Процессы, проходившие в грунте тела насыпи, определяются явлениями разжижения грунта [8]. При полном водонасыщении пористой структуры массива резко уменьшаются силы сцепления (трения) между частицами, и грунт переходит в разжиженное состояние, что вызывает оплывание тела насыпи. Далее под действием веса вышележащих слоев происходит переукладка частиц, что приводит к консолидации и уплотнению грунта. Изменяются форма насыпи и ее вес из-за уноса мелкофракционных частиц, а значит, и плотность. Форма насыпи до и после подтопления приведена на рис. 10.

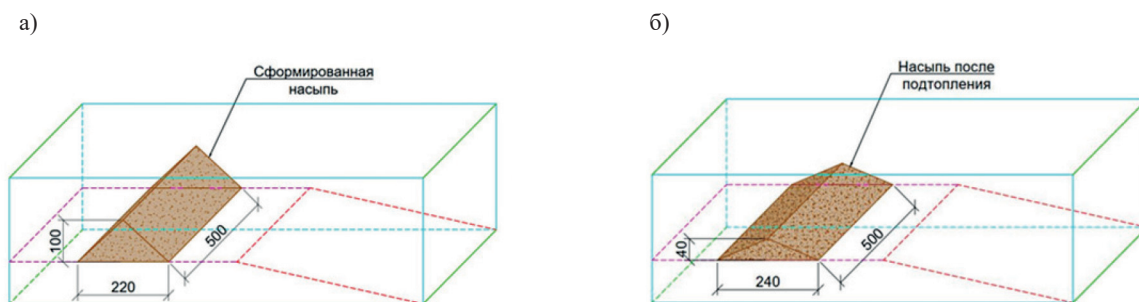


Рис. 10. Форма насыпи: а — до прокачки воды; б — после прокачки воды

Определенная после прокачки плотность грунта тела насыпи составила $1,830 \text{ г/см}^3$, что также свидетельствует об уплотнении и консолидации грунтов, подвергшихся воздействию фильтрационного потока.

Обсуждение (Discussion)

В процессе исследования устойчивости грунтовых сооружений под воздействием на них воды можно отметить следующее. Структура и свойства грунтов, из которых сложены естественные берега водотоков и водохранилищ, а также искусственные гидротехнические сооружения: насыпи, дамбы и грунтовые плотины, во многом определяют напряженно-деформированное состояние как грунтовых массивов, так и расположенных на них сооружений и конструкций.

Формирование водохранилищ после возведения в русле водотока подпорных сооружений приводит к подъему уровня грунтовых вод, насыщению массива грунтовых сооружений и берегов водохранилищ водой, в грунтовом массиве формируется поле фильтрационных потоков с достаточно высокими градиентами напоров. Одной из характерных особенностей рыхлых водонасыщенных несвязных грунтов является их способность переходить в разжиженное состояние [9].

На частицы грунта, окруженные водой, действует взвешивающая (Архимедова) сила. Кроме того, при движении фильтрационного потока в грунте его частицы оказывают задерживающее (тормозящее) воздействие на поток. Это происходит в результате трения двигающейся воды о поверхность частиц, а также отклонения струек воды от прямолинейного направления при столкновении их с минеральными частицами. Кроме того, возникают внутренние сопротивления движущейся воды, вызванные взаимным воздействием струй, имеющих различное направление и скорость движения. Тормозящее влияние скелета грунта вызывает снижение скорости воды по пути фильтрации, вследствие чего появляется фильтрационное давление на скелет, так называемое *гидродинамическое давление*, представляющее собой силу, с которой движущаяся вода воздействует на грунтовый скелет. Сила гидродинамического давления направлена по касательной к линии тока и действует в ту же сторону, что и вода, при этом гидродинамическое давление стремится продвинуть частицы скелета по направлению движения воды.

Взвешивающая сила и сила гидростатического давления совместно воздействуют на частицы скелета грунта. Результирующее действие этих двух сил определяется в результате их векторного сложения. При восходящем фильтрационном потоке фильтрационное и взвешивающее воздействия будут действовать в одном направлении и их влияние суммируется. Реакция песчаных и гравелистых грунтов на эту нагрузку существенным образом зависит от их пористости. Немалое значение имеет также гранулометрический состав грунта.

С точки зрения физических свойств грунтов можно выделить гравитационную, тиксотропную и плавунную природу их разжижения [10]. Основным механизмом *гравитационного разжижения* является увеличение порового давления свободной воды, заполняющей пространство между частицами скелета при динамическом воздействии на грунт. При значительном (вплоть до полного) водонасыщении породы, т. е. полном заполнении порового пространства свободной водой, при увеличении нагрузки на грунтовый массив (например, сил давления со стороны верхнего бьефа при заполнении водохранилища) и небольших коэффициентах фильтрации вода не успевает покинуть поры, в которых она находилась, поровое давление существенно возрастает, что приводит к разрыву контактов между частицами грунта, трение между ними практически исчезает, частицы взвешиваются и грунт, перейдя в состояние суспензии, разжижается. При этом исчезает сопротивление грунта сдвигающим усилиям.

Тиксотропное разжижение определяется способностью грунта под влиянием внешнего воздействия (вибрации, встряхивания) разжижаться, переходить в состояние «тяжелой жидкости», а затем, когда воздействие прекращается, возвращаться в первоначальное состояние, сгущаться и упрочняться. Механизм тиксотропных процессов в грунтах заключается в том, что в случае механического воздействия на систему вода, связанная с частицами грунта силами молекулярных и химических связей, переходит в свободное состояние, из-за чего структурные связи между частицами нарушаются, и система быстро разжижается. В публикации [11] отмечается, что грунты, в которых возникают процессы тиксотропии, характеризуются преобладанием частиц размером не более 0,01 мм, а также наличием в их составе не менее 2 % глинистых частиц. Поэтому тиксотропностью не обладают чистые песчаные и гравийно-галечниковые грунты. Процессы тиксотропного разупрочнения протекают весьма быстро, а длительность тиксотропного восстановления (уплотнения) существенно зависит от химико-минерального состава, дисперсности и влажности грунтов и может изменяться от десятков минут до десятков суток [10].

Плавунные явления характерны для «переходных» (от чистых песков к глинам) видов грунтов, таких как пылеватые пески, супеси и некоторые разности легких суглинков. Плавунные грунты в разжиженном состоянии обладают минимальной вязкостью и наибольшей подвижностью среди всех дисперсных грунтов. Наличие глинистых частиц препятствует быстрому развитию уплотнения системы, что наряду с низкими коэффициентами фильтрации пылеватых песков и супесей обуславливает важную особенность плавунных систем — способность их к длительному нахождению в разжиженном состоянии после прекращения динамического воздействия. Наличие глинистых частиц повышает плавунные свойства за счет «смазывающих» свойств на контактах песчаных зерен и снижения фильтрационной способности грунта.

Процессы консолидации грунтов, т. е. их уплотнения при выжимании воды из порового пространства, также определяются изначальной водонасыщенностью грунта и его фильтрационными характеристиками. При малых коэффициентах фильтрации осадки сооружений, величина и скорость которых определяются процессами консолидации, могут наблюдаться в течение длительного периода времени.

Для ускорения процесса уплотнения и упрочнения грунтов насыпей, повышения их несущей способности (в случае возведения на насыпи сооружений) представляется целесообразным использование механизма искусственного подтопления грунтового массива возводимого сооружения перед вводом его в эксплуатацию. Такой процесс будет заключаться в затоплении построенного сооружения и последующем его осушении для обеспечения ускоренной консолидации. При этом возможно разделение процедуры на этапы в процессе строительства, при котором по мере возведения следует подтапливать построенные части сооружения и осуществлять уплотнение послойно. С этой целью необходимо тщательно и обоснованно подходить к выбору минерального и гранулометрического состава грунта, используемого для формирования насыпного сооружения. При этом должна быть обеспечена как возможность полного водонасыщения грунта насыпи, так и достаточно быстрое и эффективное удаление воды из грунтового массива, его уплотнение и консолидация, обеспечивающие отсутствие последующих деформаций грунтового сооружения.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выполненный анализ характеристик грунтов насыпных сооружений, примеров упрочнения таких сооружений и оснований напорных конструкций, располагаемых на грунтовых массивах, позволяет сделать вывод о том, что одним из эффективных способов уплотнения насыпей может служить их подтопление.
2. Кратковременное совместное воздействие сил взвешивания и гидродинамического давления приводит к переукладке частиц грунта, формирующих массив насыпи, и более плотной их упаковке.
3. Предварительное подтопление возведенных сооружений позволяет регулировать прочностные свойства грунтового массива, увеличивая их несущую способность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колосов М. А. Консолидация грунтов в основании шлюза — важнейший критерий оценки надежности гидротехнического сооружения / М. А. Колосов, К. П. Моргунов // Речной транспорт (XXI век). — 2019. — № 1(89). — С. 44–47. — EDN PWHMWG.
2. Моргунов К. П. Особенности поведения грунтов в основании гидротехнических сооружений / К. П. Моргунов, М. А. Колосов // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 02–05 июня 2021 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2021. — С. 66–81 — EDN PQQWRG.
3. Корпачев В. П. Влияние размыва берегов водохранилищ ГЭС на засорение их древесной массой / В. П. Корпачев // Вестник КрасГАУ. — 2008. — № 4. — С. 91–96. — EDN JUGPDL.
4. Корпачев В. П. Проблемы прогнозирования загрязнения и засорения древесной массой и органическими веществами водохранилищ высоконапорных ГЭС / В. П. Корпачев // Успехи современного естествознания. — 2004. — № 2. — С. 110–113. — EDN IMPIZL.
5. Колосов М. А. О причинах просадки основания строящейся Загорской ГАЭС-2 / М. А. Колосов, К. П. Моргунов, П. П. Чинаков // Фундаменты. — 2022. — № 1(7). — С. 38–39. — EDN RUCHRZ.
6. Александров А. В. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы / А. В. Александров, Е. Н. Беллендир, С. Я. Лащенко, Р. Ш. Альжанов // Гидротехническое строительство — 2016. — № 7. — С. 2–10. — EDN WHPWUX.
7. Лаврусевич А. А. Развитие подземной эрозии грунтов, примыкающих к бетонным сооружениям (на примере ЗаГАЭС-2) // Гидротехническое строительство / А. А. Лаврусевич, В. П. Хоменко, И. А. Лаврусевич. — 2024. — № 1. — С. 53–57. — EDN SMRLIG.
8. 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. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-3-201-210. — EDN JPGRWC.
9. Моргунов К. П. Разжижение грунтов — причина аварий на гидротехнических сооружениях / К. П. Моргунов, П. А. Гарибин // Гидротехника. — 2022. — № 4(69). — С. 9–18. DOI: 10.55326/22278400_2022_4_9. — EDN JMPAQQ.
10. Моргунов К. П. Особенности динамической реакции водонасыщенных грунтов, залегающих в основании гидротехнических сооружений / К. П. Моргунов // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 29–31 мая 2023 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2023. — С. 45–67 — EDN ZTFZTC.
11. Ступников В. С. Тиксотропия глинистых грунтов / В. С. Ступников, Е. М. Данчук, Л. И. Черкасова // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. — 2020. — № 1. — С. 2. — EDN ZQOUGR.

REFERENCES

1. Kolosov, M. A. and K. P. Morgunov «Konsolidatsiya gruntov v osnovanii shlyuza — vazhneyshiy kriteriy otsenki nadezhnosti gidrotekhnicheskogo sooruzheniya.» *Rechnoy transport (XXI vek)* 1(89). (2019): 44–47.

2. Morgunov, K. P. and M. A. Kolosov. "Osobennosti povedeniya gruntov v osnovanii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy." *Vodnye puti i ruslovye protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putey: Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 02–05 iyunya 2021 goda* Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova, 2021: 66–81.
3. Korpachev, V. P. "Vliyanie razmyva beregov vodokhranilish GES na zasorenie ikh drevesnoy massoy." *Vestnik KrasGAU* 4. (2008): 91–96.
4. Korpachev, V. P. "Problemy prognozirovaniya zagryazneniya i zasoreniya drevesnoy massoy i organicheskimi veshchestvami vodokhranilish vysokonapornykh GES." *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* 2. (2004): 110–113.
5. Kolosov, M. A., K. P. Morgunov and P. P. Chinakov "O prichinakh prosadki osnovaniya stroyascheysya Zagorskoy GAES-2." *Fundamenty* 1(7). (2022): 38–39.
6. Aleksandrov, A. V., E. N. Bellendir, S. Ya. Laschenov and R. Sh. Al'zhanov "Likvidatsiya posledstviy osadki zdaniya stantsionnogo uzla Zagorskoy GAES-2 i vosstanovitel'nye raboty." *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* 7. (2016): 2–10.
7. Lavrusevich, A. A., V. P. Khomenko and I. A. Lavrusevich "Razvitie podzemnoy erozii gruntov, primykayuschikh k betonnykh sooruzheniyam (na primere ZaGAES-2)." *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* 1. (2024): 53–57.
8. Morgunov, K. P. and M. A. Kolosov "Soil Liquefaction Problems in the Foundations Hydraulic Structures." *Science and Technique* 21.3 (2022): 201–210. DOI: 10.21122/2227–1031–2022–21–3–201–210.
9. Morgunov, K. P. and P. A. Garibin "Soil liquishing is a cause of accidents at hydrotechnical facilities." *Hydrotehnika* 4(69). (2022): 9–18. DOI: 10.55326/22278400_2022_4_9.
10. Morgunov, K. P. "Features of the dynamic reaction of water-saturated soils at the base of hydro-engineering structures." *Vodnye puti i ruslovye protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putey: Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 29–31 maya 2023 goda*. Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova, 2023: 45–67.
11. Stupnikov, V. S., E. M. Danchuk and L. I. Cherkasova "Thixotropy of clay soils." *International Journal of Applied Sciences and Technology Integral* 1. (2020): 2–2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Моргунов Константин Петрович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: morgunovkp@gumrf.ru

Колосов Михаил Александрович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kolosovma@gumrf.ru

Чинаков Павел Павлович —

аспирант
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: pavelchinakov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Morgunov, Konstantin P. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: morgunovkp@gumrf.ru

Kolosov, Michail A. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kolosovma@gumrf.ru

Chinakov, Pavel P —

graduate student
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: pavelchinakov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2024 г.
Received: Dec. 24, 2024.