

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-3-201-210>

УДК 624.131.439; 627.43

Проблемы разжижения грунтов в основаниях гидротехнических сооружений

Канд. техн. наук, доц. К. П. Моргунов¹⁾, докт. техн. наук, проф. М. А. Колосов¹⁾

¹⁾Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Представлен анализ вероятности и условий возникновения разжижения грунтов, залегающих в основании и окрестностях гидротехнических сооружений. Как правило, гидротехнические сооружения возводятся в долинах водотоков, структура грунтов в которых способствует возникновению процессов разжижения. Грунты эти мелкофракционные несвязные, состоящие обычно из мелко- и среднезернистых или пылеватых песков, супесей, перемежающихся слоями суглинков. Массивы под напорными гидротехническими сооружениями достаточно водонасыщенные. Разжижение грунтов происходит в результате разрушения структурных связей между частицами в водонасыщенных дисперсных грунтах под действием напряжений разного типа. Внешняя динамическая или статическая нагрузка, приложенная к водонасыщенному массиву, сложенному из слабых мелкодисперсных грунтов, может привести к полной или частичной потере грунтом несущей способности и переходу его в текучее состояние. Величина сопротивления грунта сдвигу определяется степенью его водонасыщенности; при влажности порядка 20 % угол естественного откоса песчаных грунтов существенно уменьшается. Восстановлению прочностных свойств грунтов препятствует поровое давление воды, процесс уплотнения (консолидации) массива грунта происходит после отжатия воды из пор, время протекания которого зависит от фильтрационных свойств массива. Разжижение грунтов приводит к нарушению нормального функционирования гидротехнического сооружения, созданию аварийных ситуаций. В статье представлены примеры возникновения аварий на гидротехнических сооружениях России, вызванных явлениями разжижения. Отмечено, что основные направления защиты конструкций гидротехнических сооружений от опасного разжижения – предотвращение возможности возникновения разжижения и уменьшение его вредных последствий. В этой связи рассмотрено несколько способов – уплотнение и упрочение грунтов в основании сооружений; устройство фильтрующей пригрузки с использованием геотекстиля и георешеток; создание эффективной дренажной (водоотводящей) системы.

Ключевые слова: разжижение грунта, водонасыщенные мелкодисперсные грунты, динамические и статические нагрузки, поровое давление, сопротивление сдвигу

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-3-201-210>

Soil Liquefaction Problems in the Foundations Hydraulic Structures

К. Р. Morgunov¹⁾, М. А. Kolosov¹⁾

¹⁾Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (Saint-Petersburg, Russian Federation)

Abstract. An analysis of the probability and conditions for the occurrence of soil liquefaction at the base and in the vicinity of hydraulic structures is presented in the paper. As a rule, hydraulic structures are erected in the valleys of watercourses, the structure of the soil in which contributes to the occurrence of liquefaction processes. These soils are fine-grained,

Адрес для переписки

Моргунов Константин Петрович
Государственный университет морского и речного флота
имени адмирала С. О. Макарова
ул. Двинская, 5/7,
198035, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
Тел.: +7 812 748-96-92
morgunovkp@gumrf.ru

Address for correspondence

Morgunov Konstantin P.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7, Dvinskaya str,
198035, Saint-Petersburg, Russian Federation
Tel.: +7 812 748-96-92
morgunovkp@gumrf.ru

non-cohesive, usually consisting of fine- and medium-grained or silty sands, sandy loams, interspersed with layers of loams. Massifs under pressure hydraulic structures are quite water-saturated. Soil liquefaction occurs as a result of the destruction of structural bonds between particles in water-saturated dispersed soils under the action of stresses of various types. An external dynamic or static load applied to a water-saturated massif composed of weak, finely dispersed soils can lead to a complete or partial loss of soil bearing capacity and its transition to a fluid state. The magnitude of soil resistance to shear is determined by the degree of its water saturation; at a moisture content of about 20 %, the angle of repose of sandy soils is significantly reduced. The restoration of the strength properties of soils is prevented by the pore water pressure, the process of compaction (consolidation) of the soil mass occurs after the water is squeezed out of the pores, the flow time of which depends on the filtration properties of the massif. Liquefaction of soils leads to a disruption in the normal functioning of a hydraulic structure, the creation of emergency situations. The paper provides examples of accidents at hydraulic structures in Russia caused by liquefaction phenomena. It is noted that the main directions of protecting the structures of hydraulic structures from dangerous liquefaction are to prevent the possibility of liquefaction and the reduction of its harmful effects. In this regard, several methods are considered – compaction and strengthening of soils at the base of structures; filtering surcharge device using geotextiles and geogrids; creation of an effective drainage system.

Keywords: soil liquefaction, water-saturated fine soils, dynamic and static loads, pore pressure, shear resistance

For citation: Morgunov K. P., Kolosov M. A. (2022) Soil Liquefaction Problems in the Foundations Hydraulic Structures. *Science and Technique*. 21 (3), 201–210. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-3-201-210> (in Russian)

Введение

При проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС) особое внимание следует уделять структуре и свойствам грунтов в их основании, в теле грунтовых плотин и дамб, а также фильтрационным процессам в массиве этих грунтов. Сооружения гидроузлов располагаются, как правило, в речных долинах на аллювиальных грунтах, представляющих собой перемежение слоев песка и суглинка. Такие грунты принято считать слабыми, несвязными. В процессе строительства подпорных сооружений – дамб, плотин, шлюзов – в русле водотока (реки, канала) создаются перепады уровней, поддерживаемые напорным фронтом гидроузла, формируются водохранилища. Это способствует водонасыщению грунтов основания. В приплотинной области в массиве грунтов основания сооружений и берегов водохранилищ формируется поле фильтрационных потоков с достаточно высокими градиентами напоров. Такие условия способствуют развитию процессов подтопления и разжижения грунтов. Многочисленные инциденты, зафиксированные на ГТС, заставляют внимательнее рассмотреть возможность разжижения грунтов и его влияние на состояние (устойчивость, сохранение целостности и эксплуатационных свойств) сооружений.

Материалы и методы

Одной из характерных особенностей рыхлых водонасыщенных несвязных грунтов явля-

ется их способность переходить в разжиженное состояние [1]. Разжижением грунта принято называть переход его в текучее состояние вне зависимости от причины такого изменения и величины последующих деформаций [2–4]. При этом происходит разрушение связей между частицами в водонасыщенных дисперсных грунтах. Процесс разжижения состоит из трех стадий (рис. 1):

– разрушения исходной структуры грунта вследствие разрыва структурных связей между частицами, например при силовом воздействии на массив грунта, при этом частицы грунта покидают свое первоначальное положение;

– стадии, когда частицы грунта стремятся занять новое, более устойчивое положение в дисперсной структуре массива, однако этому противодействует поровое давление в пространстве между частицами. Таким образом, грунт оказывается в разжиженном состоянии, при котором из-за потери непосредственных контактов между частицами не происходит передачи нагрузки от собственного веса частиц или внешней нагрузки и система частиц приобретает способность растекаться;

– стадии переукладки частиц при отжатии воды, восстановления структуры и постепенного упрочения (консолидации) грунта, время которого зависит от скорости отжатия воды. При этом происходит полная или частичная потеря грунтом несущей способности, несвязный водонасыщенный грунт на время превращается в тяжелую вязкую жидкость.

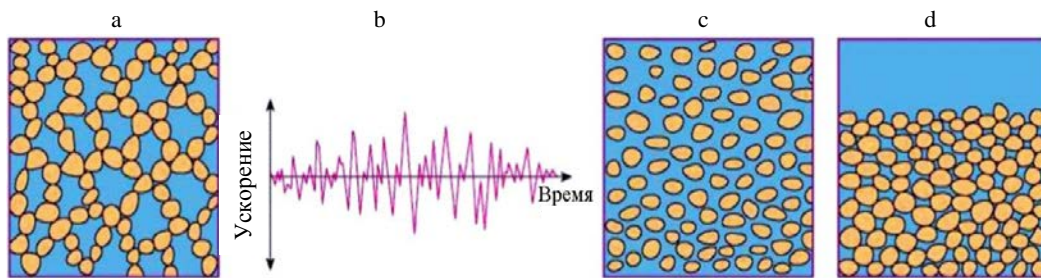


Рис. 1. Разжижение и уплотнение песчаного грунта [4]: а – рыхлый водонасыщенный грунт с крупными порами; б – динамическое воздействие на массив грунта; с – водонасыщенный грунт разжижен, связи между частицами разрушены; д – уплотненный грунт после отжатия воды и оседания частиц

Fig. 1. Liquefaction and compaction of sandy soil [4]: а – loose water-saturated soil with large pores; б – dynamic impact on the soil mass; с – water-saturated soil is liquefied, bonds between particles are broken; д – compacted soil after squeezing out water and settling particles

Необходимым условием для возникновения явлений разжижения грунта является полное или близкое к полному насыщение грунта водой [1]. Чаще всего разжижаются водонасыщенные мелкие и пылеватые пески, супеси [2]. Однако, как показали исследования, разжижаться могут также глинистые [5], щебенистые [6] и гравелистые [7, 8] грунты.

В зависимости от характера нагрузок, воздействующих на массивы грунта, разжижение может проявляться в различной степени. При землетрясениях, характеризующихся значительными амплитудами колебаний нагрузок, разжижения возникают на больших площадях неожиданно и происходят в течение нескольких минут, иногда даже секунд, принося большой ущерб и порой сопровождаясь человеческими жертвами. Именно разжижением грунтов зачастую вызываются разрушения при землетрясениях [9–12].

Разжижение грунта может проявиться не только при динамических (землетрясения), но и при статических нагрузках на массив. Пример этого – одна из крупнейших инженерных катастроф в США (авария на плотине Сен-Френсис, Калифорния), а также описанные ниже аварии на реке Вайонт у горы Монте-Ток (Италия) и обрушение склона на реке Бурее (Дальний Восток, Россия). В данных случаях определяющим фактором являлась степень водонасыщения массива грунта. При этом чем больше пористость грунта, тем при меньших нагрузках начинается разжижение. Прочность и устойчивость грунтов определяются величиной сцепления, характеризующего сопротивление ча-

стиц перемещающим усилиям, и углом внутреннего трения – эти два параметра вместе обуславливают сопротивление грунтов сдвигу. Исследования [4, 13, 14] показывают, что угол естественного откоса при влажности 13–14 % имеет обычное для соответствующих песков и супесей значение; при повышении влажности этот угол резко уменьшается. Следует учитывать, что при повышении водонасыщенности грунта, т. е. все более полном заполнении пор водой, на частицы грунта начинает действовать взвешивающая (архимедова) сила. Структура естественных грунтов характерна разным размером частиц (в диапазоне, определяемом характером грунта), беспорядочной их укладкой, вызывающей образование пор всевозможного размера, различные жесткость скелета и степень устойчивости отдельных частиц, нагруженных в разной степени. Поэтому в массиве грунта напряжения от веса вышележащих слоев для различных точек оказываются неодинаковыми, и взвешивающее давление воды, действующее на частицы, зачастую становится соизмеримым с действующими напряжениями и является той силой, которая приводит к нарушению устойчивости частиц и их перемещению. При деформации (сдвиге) частиц грунтового массива нарушается их контакт друг с другом, и вместо песчаного грунта, сохранявшего ранее устойчивость благодаря силам трения частиц одна о другую, получается суспензия, т. е. вода с взвешенными в ней частицами, происходит разжижение массива грунта. Новой укладке частиц препятствует наличие в порах воды, и требуется определенное время на ее

отжатие. Чем более слабая водоотдача и низкие фильтрационные свойства у грунтового массива, тем дальше грунт находится в разжиженном состоянии.

Как показывает опыт [2, 4], наибольшей предрасположенностью к разжижению обладают «переходные» (от чистых песков к глинам) виды грунтов, такие как пылеватые слабоглинистые пески, супеси и некоторые типы легких суглинков. Они содержат некоторое количество весьма мелких частиц, что определяет их слабую водоотдачу и низкое значение коэффициента фильтрации. Поэтому такие грунты в разжиженном состоянии имеют минимальную вязкость (меньшую, чем у разжиженных глин или песков) и наибольшую подвижность среди всех дисперсных грунтов. Наличие глинистых частиц обуславливает способность этих грунтов к длительному нахождению в разжиженном состоянии. При этом предположение о том, что при замачивании снижается прочность материала грунтов и уменьшается коэффициент трения между частицами грунта, не находит подтверждения, так как процессы разжижения, сопровождающиеся просадками поверхности, наблюдаются не только в тех материалах, прочность которых уменьшается при намокании (например, в известняках), но и в грунтах, прочность частиц которых неизменна в сухом и водонасыщенном состоянии (гранитах, диабазе). Изменение коэффициента трения при замачивании грунтов действительно происходит, однако у гидрофобных материалов коэффициент трения уменьшается, а у гидрофильных (кварц, кальцит), из которых преимущественно и слагаются песчаные грунтовые массивы, увеличивается при замачивании.

Порой возникает неполное (частичное) разжижение, при котором часть сжимающих напряжений в скелете грунта сохраняется и грунт обладает некоторой несущей способностью. Количественной характеристикой степени разжижения в [1] предложено считать отношение избыточного давления p суспензии при частичном разжижении к наибольшему избыточному давлению p_{\max} , соответствующему полному разжижению грунта:

$$N = \frac{p}{p_{\max}}$$

Значения N могут меняться от 0 (отсутствие разжижения) до 1 (полное разжижение).

Устойчивость к разжижению в современной мировой практике [3] обычно оценивают коэффициентом безопасности, который определяется как отношение допускаемого сопротивления разжижению, выраженное величиной циклических напряжений, способных вызвать разжижение, к циклическому напряжению, возникающему в результате силового воздействия на грунт (например, землетрясения):

$$F_L = \frac{CRR}{CSR} K_\sigma K_\alpha,$$

где CRR (cyclic resistance ratio) – относительная амплитуда динамических напряжений – коэффициент циклического сопротивления; CSR (cyclic stress ratio) – критическое значение амплитуды напряжений – коэффициент циклического напряжения; K_σ – коэффициент, учитывающий напряжения от собственного веса грунта; K_α – тоже, учитывающий наклон поверхности земли, принимаемый равным 1 при наклоне поверхности менее 6° .

Принято считать [15], что при $F_L = 1,25 \dots 1,50$ слой грунта устойчив к разжижению, при $F_L = 1,0 \dots 1,2$ грунты разжижаемы.

В истории известно немало происшествий, в том числе тяжелых аварий и катастроф, произошедших вследствие потери устойчивости грунтовых слоев. При этом значительные массы грунта внезапно переходили в состояние суспензии и растекались, сооружения, построенные на таких грунтах, сдвигались и, постепенно погружаясь, «утопали» в грунте. Разжижение слоев грунта вызывало оползни и плывуны. Множество происшествий связано с землетрясениями [16]: в китайской провинции Ганьсу в 1920 г. (общее число жертв, по данным Международного института сейсмологии, составило более 235 тыс. чел.); в Таджикистане вблизи города Хаит в 1949-м (погибло более 7200 чел.); на Аляске в 1964 г. (около 70 зданий разрушено, погиб 131 чел.); в Гиссарской долине Таджикистана в 1989 г. (274 чел. погибли, десятки людей были ранены и госпитализированы). Особую опасность создают дождевые и талые воды, увеличивающие поступление

воды в грунт, что является важным фактором, провоцирующим оползни.

Особенностями возведения и функционирования гидротехнических сооружений в русле водотока, как уже отмечалось, являются формирование напорного фронта и наполнение водохранилища. Определяющую роль при этом играет характер грунтов, залегающих в основании сооружения и в ложе водохранилища, а также изменение степени их водонасыщенности в процессе наполнения водохранилища.

Инцидентом, иллюстрирующим опасность обводнения грунтов основания плотины, является катастрофа, произошедшая в 1963 г. на реке Вайонт, протекающей в итальянских Альпах к северу от Венеции. Строительство началось в 1957-м, и в течение двух лет была возведена плотина высотой 262 м и длиной по гребню 190 м. В 1960 г. началось наполнение водохранилища. Однако геология участка, занятого водохранилищем, оказалась весьма сложной. Мощные известняки, слагающие гору Монте-Ток, на склоне которой возводилась ГЭС, круто падают в направлении оси синклинали, а затем выполаживаются и обнажаются в ущелье реки Вайонт. Среди известняков часто встречаются и тонкие прослой мергелей. На склоне Монте-Ток эту массу породы удерживала сила трения с подстилающими наклонно залегающими пластами. После начала наполнения водохранилища было зафиксировано медленное оползание склона горы. В октябре 1960 г. скорость движения всего склона увеличилась, и в известняке развилась трещина (рис. 2).

Однако после того как уровень воды в водохранилище понизили, движение прекратилось.



Рис. 2. Трещина в грунте на склоне горы Монте-Ток

Fig. 2. Crack in the ground on the slope of mount Monte-Tok

В ноябре 1960 г. весь склон горы Монте-Ток ежедневно перемещался в среднем на 4,3 см, это движение продолжалось в течение 10 сут. Было зафиксировано повышение уровня грунтовых вод, установлено, что перемещение заметно ускорялось, когда водохранилище оказывалось заполненным до наиболее высокой отметки. Поэтому заполнение стали проводить этапами и под постоянным контролем. К сентябрю 1963 г. общее перемещение склона Монте-Ток на различных участках составило до 4 м. В июле 1963-го отметка воды в водохранилище впервые превысила 690 м над уровнем моря и склон Монте-Ток начал двигаться быстрее. К концу сентября он уже перемещался на 3 см/сут. Поэтому уровень воды понизили до 690 м. Однако, несмотря на понижение уровня воды, склон горы все еще продолжал двигаться. Контрольные наблюдения показали, что 8 октября весь оползающий участок уже двигался как единая масса, на следующее утро скорость движения достигла 20 см/сут. В этот же день прошел сильный дождь. 9 октября 1963 г. весь склон Монте-Ток устремился вниз в виде огромного оползня. Около 350 млн м³ породы, перемещаясь со скоростью 110 км/ч, обрушилось в водохранилище, частично перенеслось через него и взметнулось на 120 м вверх по противоположному берегу. Волна, перехлестнув через плотину, промчалась по ущелью Вайонт стеной высотой более 150 м. Погибли 2117 чел. Сама плотина, как это ни удивительно, практически не пострадала, волна снесла лишь верхний метр ее кромки (рис. 3).



Рис. 3. Водохранилище гидроузла Вайонт, заполненное оползнем

Fig. 3. Reservoir of Wyont waterworks filled with a landslide

Результаты

Анализ инцидентов мировой практики заставляет внимательнее рассмотреть причины аварий, произошедших в последние годы на ГЭС России.

Непроектная осадка здания строящейся Загорской ГАЭС-2. Загорская гидроаккумулирующая станция (ГАЭС) расположена на реке Кунья в Сергиево-Посадском районе Московской области. Строительство второй очереди (Загорской ГАЭС-2) было начато в 2007 г. В марте 2013-го после разбора временной перемычки нижний бьеф Загорской ГАЭС-2 был заполнен водой, а здание станции поставлено под напор. К сентябрю 2013 г. строительная готовность станции превышала 90 %, ввод в эксплуатацию первых двух гидроагрегатов Загорской ГАЭС-2 был намечен на четвертый квартал 2013-го (рис. 4).



Рис. 4. Загорская ГАЭС: справа – ГАЭС-1; слева – ГАЭС-2
Fig. 4. Zagorskaya PSP: on the right – PSP-1; on the left – PSP-2

17 сентября 2013 г. в 22 ч 57 мин было обнаружено поступление воды в машинный зал строящейся Загорской ГАЭС-2. В течение короткого промежутка времени вода заполнила машинный зал станции и пристанционную площадку. В результате осмотра места происшествия и произведенных измерений было установлено, что правая часть здания ГАЭС (вместе с одним из блоков подпорной стенки) просела на 1,17 м, а левая поднялась на 0,22 м, т. е. произошел «перекос» здания на правую сторону (рис. 5). Затопление здания происходило через нарушенные деформационные швы и входные отверстия недостроенных водоводов.

После отсыпки перемычки, изолирующей здание Загорской ГАЭС-2 от нижнего бассейна,



и откачки воды начались исследования причин аварии, в том числе путем бурения скважин в районе правой части здания ГАЭС и непосредственно под самим зданием. Были обнаружены сквозные (от нижнего бьефа к верхнему) размывы грунта максимальной глубиной до 10 м. Грунты основания здания ГАЭС-2 представлены мелкозернистыми песками. Вследствие неэффективной работы противодиффузионной и дренажной систем станции в районе примыкания здания ГАЭС к подпорной стенке происходило насыщение грунтов основания водой, фильтрующейся из нижнего бьефа. 17 сентября произошло выпирание грунта в верхнем бьефе и туда прорвался разжиженный грунт из-под основания здания. Далее сформировался сквозной канал под зданием ГАЭС, через который вода поступала из нижнего бьефа в верхний.

Происходили дальнейшее вымывание грунта и расширение полости под зданием ГАЭС, что и вызвало его осадку. Процесс развивался весьма быстро и завершился после уравнивания отметок воды в верхнем и нижнем бьефах. Таким образом, авария оказалась вызванной неэффективной работой противодиффузионных устройств (что явилось следствием несовершенства их проекта), недостаточной изученностью свойств грунтов основания и неучетом возможности разжижения грунтов. Все это не позволило своевременно распознать угрозу негативного развития ситуации.

Оползень на реке Буреи. На Дальнем Востоке часто происходят оползневые явления [18]. 11 декабря 2018 г. в Хабаровском крае случилась весьма значительная по своим масштабам природная катастрофа. С крутого левого склона долины реки Буреи, расположенного примерно в 100 км выше по течению от Бурейской ГЭС, сошел крупный оползень. В месте схода оползневая долина представляет собой глубокое ущелье. Левый берег реки высокий (около 400 м) и крутой (с уклоном 30° – 35°), а правый – пологонаклонный террасовидный склон шириной более 1 км и высотой в тыловой части до 50 м над современным уровнем воды.

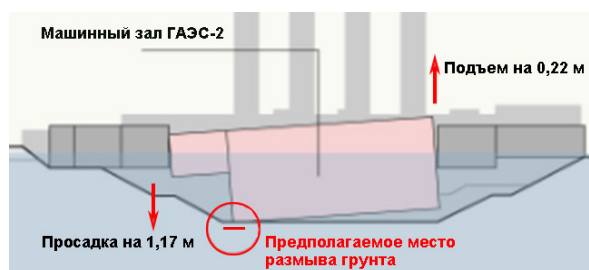


Рис. 5. Схема аварии на Загорской ГАЭС-2 [17]

Fig. 5. Scheme of the accident at the Zagorskaya PSP-2 [17]

На момент оползня долина была затоплена водами Бурейского водохранилища, поэтому ширина реки составляла 500–550 м, а глубина – около 70 м. Устьевые участки притоков реки Буреи также заполнены водой и образуют узкие и глубокие заливы протяженностью 1,5–3,0 км (рис. 6). Огромная масса горных пород, сорвавшись со склона и сместившись в глубокий водоем, вытеснила большой объем воды. В результате сформировалась высокая волна, по механизму образования представляющая собой цунами. Волна взломала лед и обрушилась на противоположный пологий склон долины. Поток продвинулся вверх по склону более чем на 1 км, достигнув высоты 56 м над урезом воды в водохранилище.

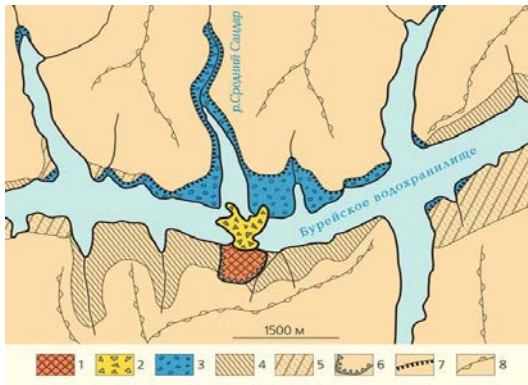


Рис. 6. Положение оползня и границы волны цунами [19]: 1 – поверхность скольжения оползня; 2 – оползневое тело; 3 – ареал уничтоженного леса; 4 – крутые склоны; 5 – пологие склоны; 6 – стенка срыва; 7 – граница заплеска волны цунами; 8 – гребни водоразделов

Fig. 6. Landslide position and tsunami wave boundaries [19]: 1 – landslide sliding surface; 2 – landslide body; 3 – area of destroyed forest; 4 – steep slopes; 5 – gentle slopes; 6 – stall wall; 7 – tsunami wave splash boundary; 8 – watershed ridges

Обратная волна вернулась к левому берегу Буреи. Она перехлестнула низкую часть оползневоего тела и подошла к подножью оползня. Постепенно снижаясь, волна прошла вверх по долине Буреи вдоль основной акватории водохранилища на 12 км и примерно на 8–10 км в противоположном направлении.

Для обеспечения нормальной работы Бурейской ГЭС, расположенной ниже по течению, в середине февраля 2019 г. специалисты Министерства обороны Российской Федерации организовали и успешно провели взрывные работы по частичному разрушению возникшей в результате оползня дамбы и восстановлению свободного перетока воды из верхней части водохранилища в нижнюю (рис. 7).



Рис. 7. Тело оползня на реке Буреи и искусственный проран в нем: слева – склон, с которого сошел оползень

Fig. 7. Body of a landslide on the Bureya river and an artificial hole in it: on the left – the slope from which the landslide came down

Рассматривая версию о разжижении грунтов как причине оползня, необходимо изучить характер грунта и его насыщение водой. Оказывается, грунт оползня – скальная, но весьма древняя (возраст около 1000 млн лет) и потому сильно раздробленная перемолотая порода. За миллионы лет она превратилась в весьма неустойчивую структуру, состоящую из рыхлого и хрупкого грунта; вблизи стенки срыва исследователи позднее обнаружили множество трещин. С другой стороны, при заполнении водохранилища, закончившемся летом 2009 г., нижняя часть склона сопки, с которой и сошел оползень, оказалась затоплена водой, уровень воды в реке поднялся на 70 м. По трещинам и пустотам вода проникла в глубь склона, делая его все более неустойчивым, при этом склон сопки достаточно крутой и высокий. Таким образом, в склоне вполне мог сформироваться слой разжиженного грунта, который и стал «смазкой» для вышележащего массива. Что послужило «пусковым» толчком для оползня, сейчас, по-видимому, определить невозможно: может быть, просто накопилось достаточное напряжение в массиве.

Дамба обвалования канала имени Москвы между судоходными шлюзами № 7 и 8. 10 января 2019 г. в районе Тушино на северо-западе Москвы произошло оплывание откоса дамбы обвалования канала имени Москвы между судоходными шлюзами № 7 и 8, и разжиженный грунт начал поступать с потоком воды на Волоколамское шоссе. Официальная причина аварии – поступление воды из канала под суглинистый противофильтрационный экран по линии разрыва между шпунтом и туннелем с дальнейшим разуплотнением суглинков на западной дамбе и возникновением про-

вала на внешнем откосе. Объяснение – низкое качество строительно-монтажных работ.

Однако представляется, что основная причина аварии – разжижение песчаных грунтов в пазухе сооружений транспортного туннеля. Ограждающая канал дамба состоит из противофильтрационного суглинистого экрана и упорной песчаной призмы, дренаж для фильтрующейся воды отсутствует. Вода, поступающая в песчаную призму из канала через контактный шов между покрытием туннеля и экраном, заполнила весь ее объем. Полному водонасыщению призмы способствовало отсутствие контурного дренажа между плитой покрытия туннеля и песчаной насыпью, т. е. 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. При превышении пороговых значений сил сцепления грунт «поплыл» (рис. 8).



Рис. 8. Поступление воды из канала имени Москвы на Волоколамское шоссе

Fig. 8. Water inflow from the Moscow Canal to Volokolamskoe Highway

Приведенные выше примеры позволяют утверждать, что во многих случаях причиной происшествий на гидротехнических сооружениях является разжижение грунтов основания ГТС либо прилегающих грунтовых массивов. Зачастую это признается и в выводах официальных расследований.

Обсуждение

Возможность возникновения в грунтах основания сооружений зон разжиженного грунта заставляет задуматься о средствах и способах защиты от этой опасности. Мероприятия, направленные на обеспечение устойчивости и прочности ГТС и защиты от разжижения грунта и его последствий, можно условно разделить на два направления:

- предотвращение возможности возникновения разжижения;
- уменьшение вредных последствий разжижения.

Для ГТС характерны значительные по площади массивы несвязных мелкофракционных грунтов в основании. Поэтому для предотвращения разжижения эффективными представляются уплотнение и упрочение грунтов в основании сооружений. Следует учитывать и то обстоятельство, что стандартные лабораторные определения свойств грунтов, в том числе их способности к разжижению, выполняются для ненагруженных образцов. В реальных условиях давление сооружения создает значительную пригрузку основания, что оказывает влияние на способность грунтов к разжижению. При этом наиболее опасные в отношении возможности разжижения – краевые и непригруженные соседние участки. Исследования [19] влияния на разжижение заглубления конструкций показали, что наличие заглубления снижает вероятность разжижения по сравнению с аналогичными сооружениями без глубоких фундаментов. Поэтому уплотнения и пригрузки имеет смысл устраивать по краю и вокруг сооружения; в земляных плотинах их целесообразно проводить на участках подводной части откоса и в местах выхода кривой депрессии на поверхность низового откоса. В качестве фильтрующей пригрузки возможны использование геотекстиля, устройство георешеток, каменной пригрузки.

Существует вариант предварительного армирования грунтов основания до начала строительства либо дополнительной обработки грунтов с целью уменьшения вероятности разжижения. В [20] для снижения рисков разжижения предложен метод искусственного введения газа (воздуха) в сжимаемые почвы. Понятно, что таким образом уменьшается водонасыщение грунта, однако остается вопрос о долговечности существования пузырьков в почве, о возможности растворения, диффузии и выходе пузырьков воздуха из грунтового массива. В [21] предлагается замена грунтов основания сооружения искусственной смесью песка, шлака и бентонита. Утверждается, что смесь песка с 4 % шлака и 3 % бентонита показала наибольшее эффективное напряжение и наименьшее избыточное поровое давление, т. е. наименьшую склонность к разжижению и наименьшее время последующей консолидации грунта.

Способом предотвращения разжижения и уменьшения его вредных последствий является

ся уменьшение водонасыщенности грунтов. Это приведет, в том числе, и к ускорению процессов их консолидации. За короткий период пребывания в разжиженном состоянии не произойдет значительных смещений грунта вследствие его растекания и, значит, ожидаемы лишь небольшие осадки сооружений за счет уплотнения грунта. Уменьшение содержания воды в грунте достигается устройством дренажных систем, использованием вакуумных иглофильтров и др.

Еще одна возможность уменьшить вредные последствия разжижения – опереть сооружение на устойчивое основание. Зачастую под слоями мелкофракционных водонасыщенных грунтов, расположенных непосредственно под основанием гидротехнического сооружения, на глубинах порядка 15–20 м от подошвы сооружения залегают более плотные слои – глины, плотные пески и т. п. Тогда для переноса нагрузки от веса бетонных конструкций сооружения на более прочные грунты основания возможно устройство конструкций в грунте, передающих нагрузки (например, свайного ростверка).

ВЫВОДЫ

1. Основными факторами, увеличивающими геотехнические риски, являются некачественные или недостаточные инженерные изыскания для строительства. Неполнота и ошибочность инженерно-геологических данных, используемых при проектировании, особенно часто приводят к катастрофам на гидротехнических объектах, поскольку на окружающие их породы воздействуют огромные гидростатические силы и изменения давлений.

2. Свойства грунтов в основании сооружений, а также напряжения, формирующиеся в массивах грунтов, могут приводить к разжижению грунтов оснований гидротехнических сооружений, что часто является причиной нештатных перемещений и деформаций конструкций таких сооружений, которые могут привести к авариям и катастрофам с человеческими жертвами и значительным материальным ущербом.

3. Разжижению грунтов способствуют наличие в основании сооружений, расположенных, как правило, в долинах водотоков, несвязных мелкодисперсных грунтов, а также то обстоятельство, что после возведения подпорных конструкций и создания напорного фронта гидроузла грунты основания насыщаются фильтрационными водами со значительными градиен-

тами напора. При отсутствии или затруднении водоотведения из массивов грунта в них формируются условия для разжижения. Эти явления необходимо учитывать как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации гидротехнических сооружений. Как показал анализ, неучет опасности разжижения грунтов приводит к неправильной оценке состояния и эксплуатационных перспектив для гидротехнических сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений / П. Л. Иванов. М.: Высш. шк., 1985. 352 с.
2. Крамаренко, В. В. Грунтоведение / В. В. Крамаренко. М.: Юрайт, 2020. 430 с.
3. Болдырев, Г. Г. Оценка потенциала грунтов к разжижению [Электронный ресурс] / Г. Г. Болдырев, И. Х. Идрисов // Геоинфо. 20 июня 2019. Режим доступа: <https://geoinfo.ru/product/boldyrev-gennadij-grigorevich/ocenka-potenciala-gruntov-k-razzhizheniyu-40984.shtml>.
4. Вознесенский, Е. А. Землетрясения и динамика грунтов / Е. А. Вознесенский // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 2. С. 101–108.
5. An Experimental Method to Verify the Failure of Coastal Structures by Wave Induced Liquefaction of Clayey Soils / V. Chávez [et al.] // Coastal Engineering. 2017. Vol. 123. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.02.002>.
6. Wen-Jong, Chang. Liquefaction Characteristics of Gap-Graded Gravelly Soils in K0 Condition / Wen-Jong Chang, Chi-Wen Chang, Jhang-Kai Zeng // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2014. Vol. 56. P. 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.10.005>.
7. Колосов, М. А. Лабораторные исследования просадочных свойств крупнообломочных материалов / М. А. Колосов // Сб. науч. тр. молодых спец. Ч. III. Водные пути и изыскания. Л.: ЛИВТ, 1973. С. 178–188.
8. Post-Liquefaction Shearing Behavior of Saturated Gravelly Soils: Experimental Study and Discrete Element Simulation / Yong Wang [et al.] // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2020. Vol. 12, Iss. 5. P. 1119–1130. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.01.007>.
9. Seed, H. B. Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake / H. B. Seed, I. M. Idriss // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1967. Vol. 93, Iss. 3. P. 83–108. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0000981>.
10. Surface Faulting Accompanying the Borah Peak Earthquake and Segmentation of the Lost River Fault, Central Idaho / A. J. Crone [et al.] // Bulletin of the Seismological Society of America. 1987. Vol. 77, No 3. P. 739–770. <https://doi.org/10.1785/BSSA0770030739>.
11. The Deadliest Stable Continental Region Earthquake Occurred Near Bhuj on 26 January 2001 / B. K. Rastogi [et al.] // Journal of Seismology. 2001. Vol. 5. P. 609–615. <https://doi.org/10.1023/A:1012228507533>.
12. Soil Liquefaction Effects in the Central Business District During the February 2011 Christchurch Earthquake / M. Cubrinovski [et al.] // Seismological Research Letters. 2011. Vol. 6, No 82. P. 893–904. <https://doi.org/10.1785/gssrl.82.6.893>.
13. Болдырев, Г. Г. Руководство по интерпретации данных испытаний методами статического и динамического

- зондирования для геотехнического проектирования / Г. Г. Болдырев. М.: Прондо, 2017. 476 с.
14. Shibata, T. Evaluation of Liquefaction Potentials of Soils Using Cone Penetration Tests / T. Shibata, V. Teparaksa // *Soils and Foundations*. 1988. Vol. 28, No 2. P. 49–60. https://doi.org/10.3208/sandf1972.28.2_49.
 15. Seed, H. B. Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data / H. B. Seed, I. M. Idriss, I. Arango // *Journal of Geotechnical Engineering*. 1983. Vol. 109, Iss. 3. P. 458–482. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1983\)109:3\(458\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1983)109:3(458)).
 16. Уолтхэм, Т. Катастрофы: неистовая Земля / Т. Уолтхэм. М.: Недра, 1982. 60 с.
 17. Схема осадки здания строящейся Загорской ГАЭС-2. Причины осадки и ликвидация последствий [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ria.ru/20131220/985485936.html>.
 18. Махинов, А. Н. Оползень и цунами на реке Бурея 11 декабря 2018 года / А. Н. Махинов // *Природа*. 2019. № 4. С. 12–22.
 19. Unutmaz, B. Effects of Basements and Adjacent Structures on Liquefaction-Triggering Potential of Foundation Soils / B. Unutmaz // *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2018. Vol. 16. P. 2757–2773. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0303-7>.
 20. Abdulhakim, Z. Durability of Partial Saturation to Counteract Liquefaction / Z. Abdulhakim, G. S. P. Madabhushi // *Ground Improvement*. 2017. Vol. 170, Iss. 2. P. 102–111. <https://doi.org/10.1680/jgrim.16.00025>.
 21. Sabbar, A. S. Static Liquefaction of Very Loose Sand–Slag–Bentonite Mixtures / A. S. Sabbar, A. Chegenizadeh, H. Nikraz // *Soils and Foundations*. 2017. Vol. 57, Iss. 3. P. 341–356. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.05.003>.
- Поступила 29.09.2021
Подписана в печать 07.11.2021
Опубликована онлайн 31.05.2022
- REFERENCES
1. Ivanov P. L. (1985) *Soils and Foundations of Hydraulic Structures*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 352 (in Russian).
 2. Kramarenko V. V. (2020) *Ground Science*. Moscow, Yurait Publ. 430 (in Russian).
 3. Boldyrev G. G., Idriss I. Kh. (2019) Evaluation of Soil Potential to Liquefy. *Geoinfo*. Available at: <https://geoinfo.ru/product/boldyrev-gennadij-grigorevich/ocenka-potenciala-gruntov-k-razzhizheniyu-40984.shtml> (in Russian).
 4. Voznesensky E. A. (1998) Earthquakes and Soil Dynamics. *Sorosovskii Obrazovatel'nyi Zhurnal = Soros Educational Journal*, (2), 101–108 (in Russian).
 5. Chávez V., Mendoza E., Silva R., Silva A., Losada M. A. (2017) An Experimental Method to Verify the Failure of Coastal Structures by Wave Induced Liquefaction of Clayey Soils. *Coastal Engineering*, 123, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.02.002>.
 6. Wen-Jong Chang, Chi-Wen Chang, Jhang-Kai Zeng (2014) Liquefaction Characteristics of Gap-Graded Gravelly Soils in K0 Condition. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 56, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.10.005>.
 7. Kolosov M. A. (1973) *Collection of Scientific Works of Young Specialists. Part III. Waterways and Surveys*. Leningrad, Leningrad Institute of Water Transport, 178–188 (in Russian).
 8. Yong Wang, Yanli Wang, Lingwei Kong, Zhiliang Sun (2020) Post-Liquefaction Shearing Behavior of Saturated Gravelly Soils: Experimental Study and Discrete Element Simulation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12 (5), 1119–1130. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.01.007>.
 9. Seed H. B., Idriss I. M. (1967) Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93 (3), 83–108. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0000981>.
 10. Crone A. J., Machette M. N., Bonilla M. G., Lienkaemper J. J., Pierce K. L., Scott W. E., Bucknam R. C. (1987) Surface Faulting Accompanying the Borah Peak Earthquake and Segmentation of the Lost River Fault, Central Idaho. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77 (3), 739–770. <https://doi.org/10.1785/BSSA0770030739>.
 11. Rastogi B. K., Gupta H. K., Mandal P., Satyanarayana H. V. S., Kousalya M., Raghavan R., Jain R., Sarma A. N. S., Kumar N., Satyamurty C. (2001) The Deadliest Stable Continental Region Earthquake Occurred Near Bhuj on 26 January 2001. *Journal of Seismology*, 5, 609–615. <https://doi.org/10.1023/A:1012228507533>.
 12. Cubrinovski M., Bray J. D., Taylor M., Giorgini S., Bradley B., Wotherspoon L., Zupan J. (2011) Soil Liquefaction Effects in the Central Business District During the February 2011 Christchurch Earthquake. *Seismological Research Letters*, 6 (82), 893–904. <https://doi.org/10.1785/gssrl.102.6.893>.
 13. Boldyrev G. G. (2017) *Guidelines for Interpreting Test Data while Using Static and Dynamic Sounding for Geotechnical Design*. Moscow, Prondo Publ. 476 (in Russian).
 14. Shibata T., Teparaksa V. (1988) Evaluation of Liquefaction Potentials of Soils Using Cone Penetration Tests. *Soils and Foundations*, 28 (2), 49–60. https://doi.org/10.3208/sandf1972.28.2_49.
 15. Seed H. B., Idriss I. M., Arango I. (1983) Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109 (3), 458–482. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1983\)109:3\(458\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1983)109:3(458)).
 16. Waltham T. (1982) *Disasters: Furious Earth*. Moscow, Nedra Publ. 60 (in Russian).
 17. Scheme of Building Settlement under Construction of the Zagorsk GAES-2 [Hydrostorage Power Plant]. Causes of Precipitation and Liquidation of Consequences. Available at: <https://ria.ru/20131220/985485936.html> (in Russian).
 18. Makhinov A. N. (2019) Landslide and Tsunami on the Bureya River on December 11, 2018. *Priroda* [Nature], (4), 12–22 (in Russian).
 19. Unutmaz B. (2018) Effects of Basements and Adjacent Structures on Liquefaction-Triggering Potential of Foundation Soils. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 2757–2773. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0303-7>.
 20. Abdulhakim Z., Madabhushi G. S. P. (2017) Durability of Partial Saturation to Counteract Liquefaction. *Ground Improvement*, 170 (2), 102–111. <https://doi.org/10.1680/jgrim.16.00025>.
 21. Sabbar A. S., Chegenizadeh A., Nikraz H. (2017) Static Liquefaction of Very Loose Sand–Slag–Bentonite Mixtures. *Soils and Foundations*, 57 (3), 341–356. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.05.003>.
- Received: 29.09.2021
Accepted: 07.11.2021
Published online: 31.05.2022