

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-670-684

INFLUENCE OF THE SOILS PROPERTIES IN THE BASE OF SHIPPING LOCKS ON THEIR PERFORMANCE

K. P. Morgunov

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

The analysis of possibility of the soil liquefaction phenomenon occurrence at the base of navigable hydraulic structures is presented. It is noted that such structures are located, as a rule, in river valleys on alluvial soils, which are usually an alternation of layers of fine-grained or silty sand and loam. With an increase in the moisture saturation of the porous layer of soils, the angle of repose and adhesion between soil particles decrease, in addition, weighing forces begin to gain more and more importance. Under the static effect on the soils from the weight of the structure and the dynamic effects created during the operation of the navigational lock in the process of filling and emptying the chamber, the base soils acquire the consistency of a suspension, bonds between particles are lost, and the soils lose their bearing capacity partially or completely. This leads to off-design movements and settlements of navigable hydraulic structures, cracks in concrete structures, destruction of dowels in temperature-sedimentary joints between structural elements. As an example of the consequences of soil liquefaction for the state of navigable hydraulic structures, the situation at the lock No. 5 of the Volga-Don shipping canal is considered. Since 2005, significant vertical settlements of the central sections of the chamber have begun at the lock No. 5. The analysis has shown that the lock is located on fine dusty sands with low filtration coefficients, particles with sizes less than 0.1 mm make up more than 84% of the soil composition. With a high water saturation of the layers, the conditions for liquefaction had appeared. A similar situation takes place at the lock No. 2 of the Volga-Baltic waterway—fine and silty sands, full water saturation of the layer, poor fluid loss, low filtration coefficients in the soil led to the appearance of a crack in the concrete abutment of the lower head. To prevent the possibility of soil liquefaction, several approaches have been proposed: reducing the water saturation of the layer (anti-seepage curtains, drainage), supporting structures on soils with high bearing capacity.

Keywords: navigable hydraulic structures, soil liquefaction, saturation of soil with water, weighing force, filtration coefficient, structure settlement.

For citation:

Morgunov, Konstantin P. "Influence of the soils properties in the base of shipping locks on their performance." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 670–684. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-670-684.

УДК 624.131.431.3; 626.45

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИИ СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗОВ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

К. П. Моргунов

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

Выполнен анализ возможности появления разжижения грунтов в основании судоходных гидротехнических сооружений. Отмечается, что эти сооружения расположены, как правило, в речных долинах на аллювиальных грунтах, представляющих собой обычно перемежение слоев мелкозернистого или пылеватого песка и суглинков. При повышении влагонасыщенности пористого слоя грунтов происходит уменьшение угла естественного откоса и сцепления между частицами грунта, а также все большее значение начинают приобретать силы взвешивания. При статическом воздействии на грунты от веса сооружения и при динамических воздействиях, создаваемых при работе судоходного шлюза в процессе наполнения-опорожнения камеры, грунты основания приобретают консистенцию суспензии, при этом теряются связи между частицами и грунты частично или полностью теряют свою несущую способность. Это приводит к непроектным перемещениям и осадкам сооружений, возникновению трещин в бетонных конструкциях,

а также разрушению шпонок в температурно-осадочных швах между элементами конструкций. В качестве примера последствий разжижения грунта для состояния судоходных гидротехнических сооружений проанализирована ситуация на шлюзе № 5 Волго-Донского судоходного канала, где с 2005 г. наблюдаются значительные вертикальные осадки центральных секций камеры. Анализ показал, что шлюз расположен на мелкодисперсных пылеватых песках с малыми коэффициентами фильтрации, частицы с размерами менее 0,1 мм составляют более 84 % состава грунта. При высокой водонасыщенности слоев появились условия для разжижения. Рассмотрена аналогичная ситуация на шлюзе № 2 Волго-Балтийского водного пути: мелкие и пылеватые пески, полная водонасыщенность слоя, слабая водоотдача, низкие коэффициенты фильтрации в грунте, что привело к возникновению трещины в бетоне устоя нижней головы. Для предотвращения возможности разжижения грунта предлагаются следующие варианты: уменьшение водонасыщения слоя (противофильтрационные завесы, дренирование) и опирание конструкций на грунты с высокой несущей способностью.

Ключевые слова: судоходные гидротехнические сооружения, разжижение грунта, насыщение грунта водой, взвешивающая сила, коэффициент фильтрации, осадки сооружения.

Для цитирования:

Моргунов К. П. Влияние свойств грунтов в основании судоходных шлюзов на их эксплуатационные характеристики / К. П. Моргунов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 670–684. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-670-684.

Введение (Introduction)

Структура и свойства грунтов, на которых расположены судоходные шлюзы, во многом определяют напряженно-деформированное состояние их конструкций и безопасные режимы эксплуатации. Поэтому желательно строить судопропускные сооружения на прочных скальных грунтах, представляющих собой устойчивую опору для конструкций шлюза. Однако, как правило, шлюзы строятся либо на естественных водных путях — реках, либо на искусственных водных путях — каналах. В равнинных речных долинах аллювиальные грунты представляют собой обычно перемежение слоев песка и суглинка, поэтому такие грунты принято считать дисперсными, несвязными¹. Судоходные каналы тоже часто трассируются по пониженным отметкам местности, представляющим собой русла небольших рек или старицы.

При создании напорного фронта судоходного гидроузла в русле водотока (реки, канала) формируются перепады уровней, возникают водохранилища верхнего бьефа. Это приводит к насыщению грунтов основания сооружений и берегов водохранилищ водой, в грунтовом массиве формируется поле фильтрационных потоков с достаточно высокими градиентами напоров. Такие условия способствуют развитию процессов подтопления и разжижения грунтов. И если учет возможностей возникновения подтопления территорий нашел отражение в Российской нормативной документации², то явление разжижения грунта и вызываемые им последствия для условий функционирования гидротехнических сооружений, расположенных на грунтах, в которых происходят процессы разжижения, не учтены в нормативных документах. Между тем опыт эксплуатации гидротехнических сооружений, в том числе судоходных шлюзов, заставляет обратить внимание на возможность разжижения грунтов и влияние этого явления на состояние сооружения (устойчивость, сохранение целостности и эксплуатационные характеристики).

Возможность разжижения грунтов достаточно известна в механике грунтов. Особенности строительства и эксплуатации сооружений, возводимых на грунтах, в которых возможно возникновение процессов разжижения, рассмотрены в работах как отечественных [1]–[3], так и зарубежных [4]–[6] авторов. Явление разжижения заключается в полной или частичной потере грунтом несущей способности и переходе его в текучее состояние в результате разрушения структуры и смещения частиц грунта друг относительно друга. Такой переход может происходить под действием внешних нагрузок,

¹ ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация: межгосударств. стандарт. Введ. 01.01.2001.

² СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Актуализиров. ред. СНиП 22-02–2003.

СП 104.13330.2016 Инженерная защита территории от затопления и подтопления. Актуализиров. ред. СНиП 2.06.15–85.

как природных (например, землетрясения), так и техногенных. Несвязный водонасыщенный грунт на время превращается в тяжелую вязкую жидкость.

Разжижением грунта принято называть переход его в текучее состояние, вне зависимости от причины такого изменения и величины последующих деформаций [1], [7]. При этом происходит разрушение связей между частицами в водонасыщенных дисперсных грунтах. Процесс разжижения состоит из трех стадий (рис. 1) [8]:

1-я стадия — при превышении предельно допустимых значений напряжения в грунте (например, при динамическом воздействии на массив грунта) происходит разрушение его исходной структуры, разрыв структурных связей между частицами, при этом частицы грунта покидают свое первоначальное положение;

2-я стадия — частицы грунта стремятся занять новое более устойчивое положение в дисперсной структуре массива, однако в водонасыщенных грунтах 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;

3-я стадия — отжатие воды и переукладка частиц, восстановление структуры и постепенное упрочнение (консолидация) грунта, время которого зависит от скорости удаления воды из порового пространства.

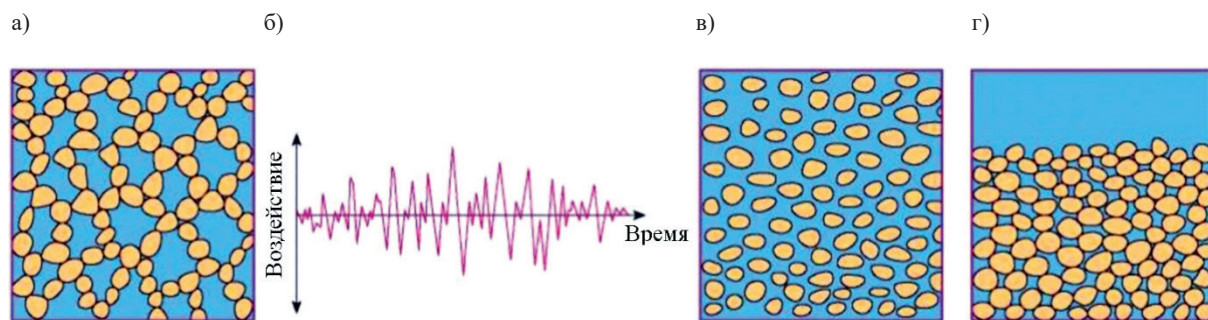


Рис. 1. Разжижение и уплотнение песчаного грунта:

- а — рыхлый водонасыщенный грунт с крупными порами;
б — динамическое воздействие на массив грунта;
в — водонасыщенный грунт разжижен, связи между частицами разрушены;
г — уплотненный грунт после отжатия воды и оседания частиц

Необходимым условием для возникновения явлений разжижения грунта является полное или близкое к полному насыщение грунта водой [1]. Чаще всего разжижению подвержены водонасыщенные мелкие и пылеватые пески, супеси [2]. Однако, как показали исследования, данному процессу могут быть подвержены также глинистые [9], щебенистые [10] и гравелистые [11], [12] грунты.

В зависимости от характера нагрузок, воздействующих на массивы грунта, разжижение может проявляться в различной степени. Порой может возникнуть неполное (частичное) разжижение, при котором часть сжимающих напряжений в скелете грунта сохраняется, и грунт обладает некоторой несущей способностью [1].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Разжижение грунта может проявиться и при статических нагрузках на массив. В этом случае определяющим фактором является 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 частиц перемещающим усилиям, и углом внутреннего трения, эти два параметра вместе обуславливают

сопротивление грунтов сдвигу. Исследования [8], [13], [14] показали, что угол естественного откоса при влажности 13–14 % имеет обычное для соответствующих песков и супесей значение, при повышении влажности он резко уменьшается, доходя при влажности 17–20 % почти до нуля. Кроме того, следует учитывать, что при повышении водонасыщенности грунта, т. е. 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), их беспорядочной укладкой, вызывающей образование пор различного размера, различную жесткость скелета, а также различную степень устойчивости отдельных частиц, нагруженных в разной степени. Поэтому в массиве грунта напряжения от веса вышележащих слоев для разных 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, сохраняющего ранее устойчивость благодаря силам трения частиц одной о другую, получается суспензия, т. е. вода со взвешенными в ней частицами, и в результате происходит разжижение массива грунта. Новой укладке частиц препятствует наличие в порах воды и требуется определенное время на ее отжатие. Чем более слабой водоотдачей и низкими фильтрационными свойствами обладает грунтовой массив, тем дольше грунт находится в разжиженном состоянии.

Как показывает опыт [2], [8], наибольшей предрасположенностью к разжижению обладают «переходные» (от чистых песков к глинам) виды грунтов, такие как пылеватые слабоглинистые пески, супеси и некоторые типы легких суглинков, содержащие определенное количество весьма мелких частиц, что определяет их слабую водоотдачу и низкое значение коэффициента фильтрации. Поэтому такие грунты в разжиженном состоянии обладают минимальной вязкостью (меньшей, чем у разжиженных глин или песков) и наибольшей подвижностью среди всех дисперсных грунтов.

Наличие глинистых частиц обуславливает способность таких грунтов к длительному нахождению в разжиженном состоянии. При этом предположение о том, что при замачивании снижается прочность материала грунта и уменьшается коэффициент трения между его частицами, не находит подтверждения, так как процессы разжижения, сопровождающиеся просадками поверхности, наблюдаются не только в тех материалах, прочность которых уменьшается при намокании (например, известняки), но и в тех грунтах, прочность частиц которых неизменна в сухом и водонасыщенном состоянии — граниты, диабазы.

Изменение коэффициента трения при замачивании грунтов действительно происходит, однако у гидрофобных материалов коэффициент трения уменьшается, а у гидрофильных, таких как кварц, кальцит, из которых преимущественно и состоят песчаные грунтовые массивы, он при замачивании увеличивается. Еще одним из условий, способствующих разжижению, является наличие в толще грунтов слоев гранулированных частиц в более мягких материалах, что встречается во многих речных отложениях. Учет возникновения явлений разжижения грунтов основания позволяет по-новому оценить причины негативных тенденций на судоходных гидротехнических сооружениях России, проявившихся в течение последних лет.

Результаты (Results)

Судоходный шлюз № 5 Волго-Донского судоходного канала

Естественные осадки секций камеры и голов судоходного шлюза № 5 (рис. 2) Волго-Донского судоходного канала (ВДСК) происходили с начала эксплуатации (1952 г.). До 2005 г. осадки не превышали предельно допустимых значений, устанавливаемых декларациями безопасности шлюза — 1 мм в год. Начиная с 2005 г. осадки центральных секций камеры шлюза существенно интенсифицировались. В период 2006–2013 гг. год интенсивность осадков по центральным секциям III, IV, V составила 1,4 мм/год; 2,8 мм/год; 2,9 мм/год соответственно. С 2013 г. осадки приобрели прогрессирующий характер, их интенсивность составила, соответственно, 3,5 мм/год; 6,0 мм/год; 5,0 мм/год (рис. 3).

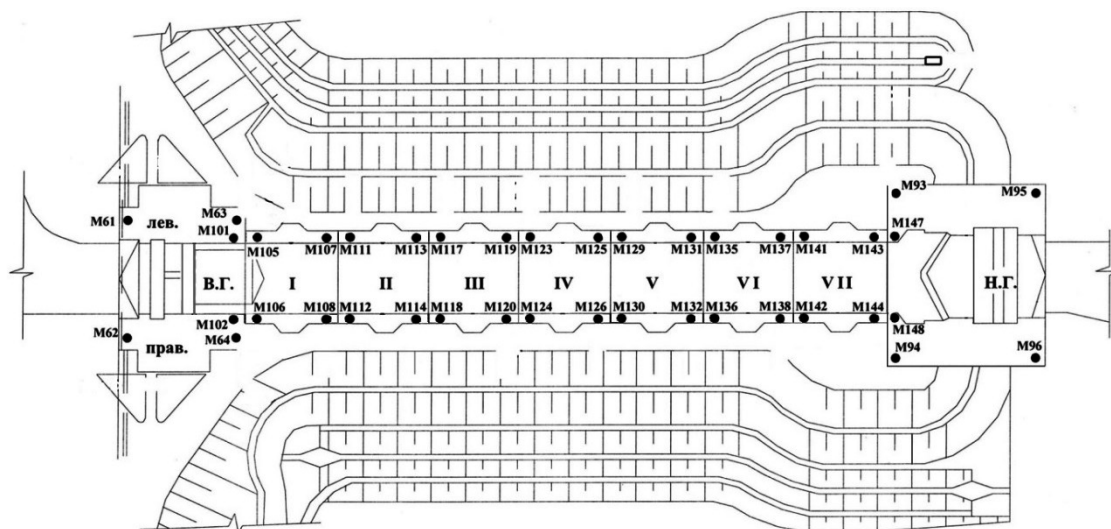


Рис. 2. Схема шлюза № 5 ВДСК:

I–VII — номера секций камеры шлюза; M62–M147 — номера осадочных марок

Рост осадок сопровождался ростом горизонтальных деформаций этих секций, которые заметно отличались от деформаций остальных секций камеры шлюза. Внешние признаки деформации основания камеры шлюза проявились в виде разрушения температурно-осадочных шпонок — осевой и между секциями камеры, а также трещин оседания, формирующихся вдоль стен камеры в обратной засышке.

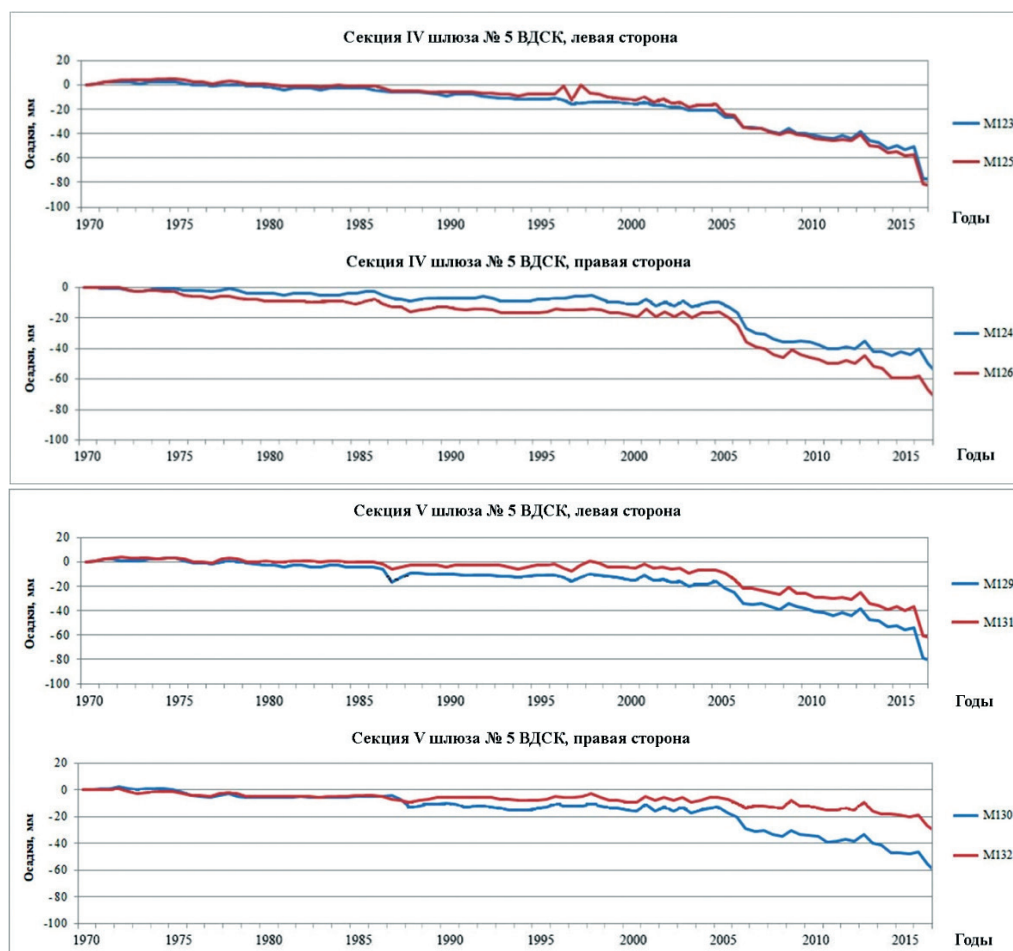


Рис. 3. Осадки марок центральных секций IV и V камеры шлюза № 5 ВДСК

Для определения причин непроектных осадок конструкций шлюза № 5 ВДСК специалистами ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» был выполнен в 2008 г. [15] и в 2019–2020 гг. [16] комплекс научно-исследовательских работ. Результаты показали следующее: гидроузел № 5 расположен на волжском склоне канала, в тальвеге балки Солянка; на участке сооружений гидроузла № 5 долина балки Солянки сужена уступами хвалынской террасы, образующей «Песчаные ворота»; основные сооружения гидроузла расположены непосредственно в зоне влияния аллювиального водоносного горизонта.

Для определения состава и характеристик грунтов, а также фильтрационного режима в основании камеры в процессе работ выполнялось бурение скважин с отбором и анализом проб грунта из основания камеры шлюза. Схема расположения скважин в секциях IV и V приведена на рис. 4.

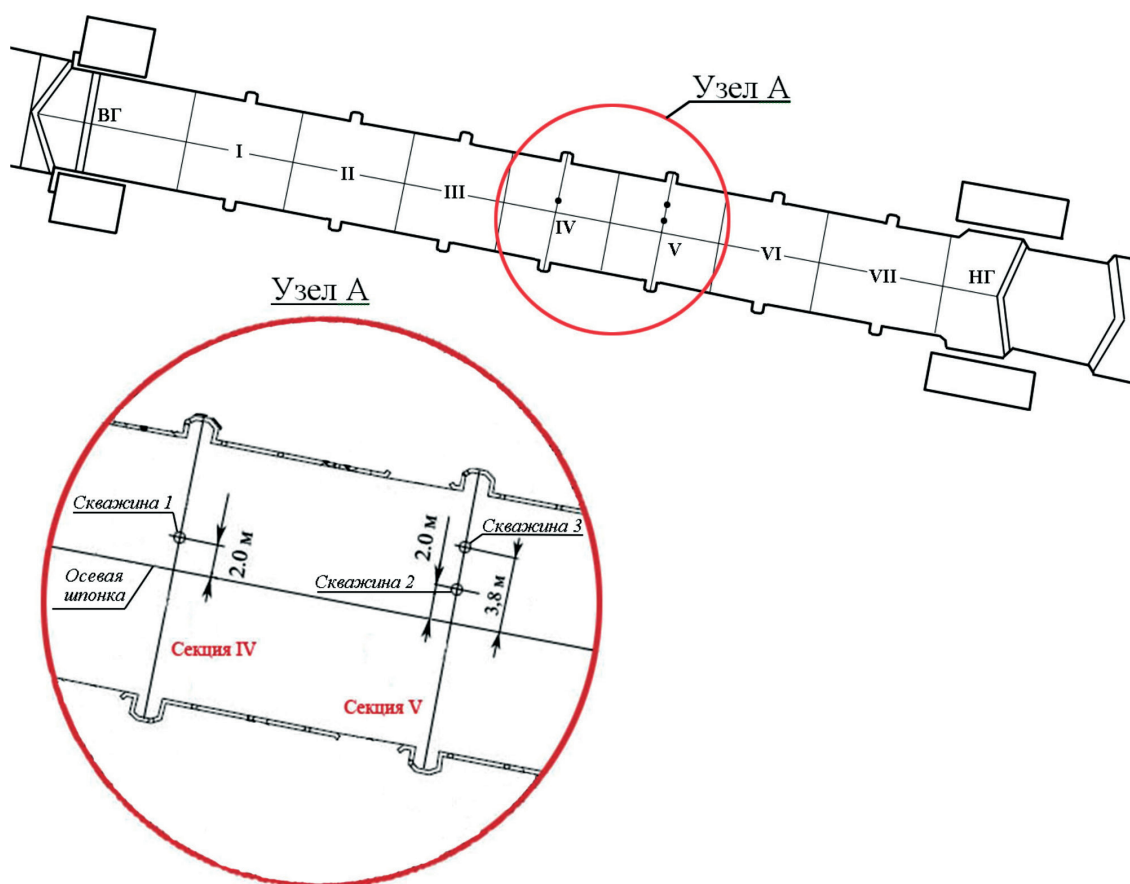


Рис. 4. Схема расположения скважин для отбора проб грунта в секциях IV и V шлюза № 5 ВДСК

Анализ колонок выработок скважин 1–3 показал [16] идентичность характера грунта под IV и V секциями: на глубине 10,0 м от отметки днища камеры залегает водоупор — глина, а весь слой между днищем и водоупором заполнен песком пылеватым, зеленовато-серым, водонасыщенным, с линзами суглинка, линзами текучей супеси.

Лабораторный анализ для песков позволил определить:

- гранулометрический состав;
- плотность и коэффициент фильтрации;
- углы естественного откоса под водой и в сухом состоянии.

Гранулометрический состав песков из проб, отобранных в скважинах 1 и 3 на различной глубине, приведен в табл. 1, откуда видно, что содержание частиц размером не более 0,1 мм в пробах из скважин 1 и 3 составляет 84,1–99,2 %.

Таблица 1

**Гранулометрический состав (распределение частиц по размеру)
проб грунта шлюза № 5 ВДСК**

Номер скважины	Глубина отбора, м	Наименование грунта по ГОСТу 25100–2011	Содержание частиц, %					
			5,0–2,0 мм	2,0–1,0 мм	1,0–0,5 мм	0,5–0,25 мм	0,25–0,10 мм	0,10–0,05 мм
1	2,5	Песок пылеватый неоднородный	0,5	0,2	0,6	0,4	15,3	83,0
1	4,5	Песок пылеватый неоднородный	3,3	2,4	6	1,2	13,6	70,5
1	7,0	Песок пылеватый неоднородный	1,1	1,1	4,6	4,2	16,4	72,6
3	3,0	Песок пылеватый неоднородный	0	0	0,4	0,4	23,3	75,9
3	7,0	Песок пылеватый неоднородный	0,5	0,1	0,4	0,3	22,5	76,2

Грунтовые воды в районе гидроузла № 5 приурочены к пескам современного аллювия балки Солянки и песчано-глинистым отложениям нижнего горизонта бакинского яруса, андреевской свиты и онкофорового горизонта. Подземные воды, циркулирующие в этих отложениях, гидравлически связаны. Водопором для них является пачка глин в основании онкофорового горизонта. Отметки поверхности грунтовых вод таковы, что на пониженных участках правой пришлюзовой площадки фильтрационные воды выклиниваются на дневную поверхность, в результате чего эта площадка в настоящее время заболочена и заросла камышом. Фильтрационные воды поступают в дренажный кювет напорной дамбы гидроузла и дренажную ванну шлюза. Об уровне грунтовых вод косвенно свидетельствует тот факт, что при бурении скважин в днище камеры шлюза грунтовая суспензия (пульпа) самоизливом выходила из скважин фонтаном высотой до 20–25 см.

Коэффициент фильтрации пылеватых песков определен в предельно рыхлом состоянии как 1,30 м/сут, в плотном состоянии — 0,03 м/сут. Угол естественного откоса для песков в водонасыщенном состоянии равен 34–35°. Коэффициент пористости песков, равный отношению объема пор грунта к объему твердых частиц в долях единицы, по данным выполненных исследований [16] для всех типов грунтов основания (пески крупные, средней крупности, мелкие и пылеватые), изменяется в пределах 0,861–1,528, что соответствует рыхлому состоянию. Таким образом, в грунтах основания камеры шлюза № 5 ВДСК сформировались необходимые для разжижения условия: грунты — пылеватые мелкозернистые пески высокой пористости, полная водонасыщенность слоя, слабая водоотдача, низкие коэффициенты фильтрации.

Грунты испытывают статическое воздействие от веса конструкций шлюза, представляющего собой массивное железобетонное сооружение, а также динамические воздействия в процессе эксплуатации — от периодического наполнения и опорожнения камеры шлюза. Напорный фронт гидроузла, сформированный грунтовой дамбой, обладает недостаточными противифльтрационными свойствами, степень гашения напора на нем составляет около 60 %, что при напоре 9,5 м позволяет водам из верхнего бьефа проникать в основание камеры шлюза. Эти обстоятельства, вместе с суффозионными процессами в грунтах, привели к тому, что в 2005 г., по-видимому, начались процессы частичного разжижения грунтов, залегающих в основании камеры, что и вызвало значительные непроектные осадки центральных секций камеры шлюза.

Судоходный шлюз № 2 Волго-Балтийского водного пути

Работы по строительству основных сооружений шлюза № 2, входящего в состав Белоусовского гидроузла Волго-Балтийского водного пути (ВБВП), начались в 1950 г., затем после перерыва (1953–1957 гг.), продолжились и завершились в 1964 г. Работы по устройству нижней головы

шлюза были выполнены в период с февраля 1957 по июль 1959 гг. [17]. Разработка котлована нижней головы производилась в обводненных переслаивающихся мягких грунтах при наличии напорного и безнапорного водоносных горизонтов. Выполнение земляных работ в этих условиях потребовало организации специальных мероприятий по водопонижению, водоотливу и выбору соответствующих схем разработки котлована. Скважинами глубинного водоотлива снизить депрессионную поверхность ниже отметки дна котлована не удавалось. Переувлажненный грунт при небольших динамических воздействиях терял сцепление, превращаясь в плавунную массу, поэтому производство работ по подготовке основания было приостановлено. По материалам исполнительной съемки котлована нижней головы на 01 июня 1956 г., было отмечено наличие разжиженного грунта основания ниже планировочной отметки дна котлована до 2,0 м. Область разжиженного грунта распространилась под основанием нижней головы с переходом на соседнюю секцию № 13 камеры шлюза. Для снижения уровня депрессионной поверхности было принято решение оконтурить площадку размещения нижней головы иглофильтровыми установками и только после проведения этих мероприятий уровень грунтовых вод средней части котлована снизился. Дополнительно пришлось поставить коллектор с иглами через 0,6 м посередине котлована нижней головы, лишь тогда уровень в средней части опустился на 1 м ниже отметки дна котлована, что позволило развернуть работы по устройству бетонной подготовки.

В основании нижней головы шлюза залегала тонкая пачка глинистых пород, подстилаемых песком. В процессе строительства суглинистые грунты, которые были вскрыты на отметках заложения основания нижней головы шлюза, в связи с их незначительной мощностью и возможным изменением их свойств в открытом котловане, были полностью заменены песчаными грунтами слоем толщиной 1,0–1,5 м.

Эксплуатация шлюза началась в 1964 г. Тогда же были установлены и впервые пронивелированы осадочные марки по углам секций и голов. Схема установки марок на нижней голове шлюза приведена на рис. 5.

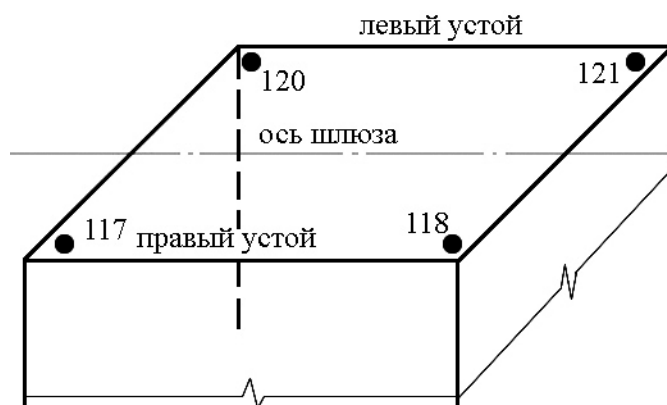


Рис. 5. Схема расположения осадочных марок на нижней голове шлюза № 2

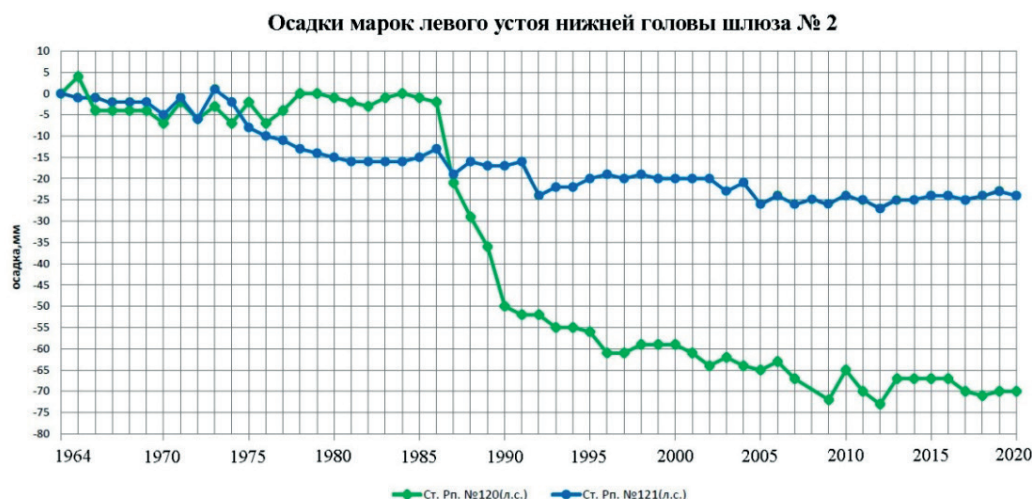
Осадки конструкции нижней головы шлюза, фиксируемые по маркам, в период 1964–1978 гг. не выходили за пределы, определяемые критериями безопасности, при этом их интенсивность составляла 0,7–1,0 мм/год (рис. 6) [17]. В 1978 г. интенсивность осадки марки № 118 увеличилась до 1,5 мм/год. В период 1985–1990 гг. на левом устое нижней головы отмечался резкий скачок осадок: по марке № 120 — с интенсивностью 12 мм/год; марка № 121 имеет два периода с резким изменением осадок с интенсивностью до 8 мм/год. На правом устое нижней головы в этот же период отмечено увеличение осадок по марке № 117 с интенсивностью до 8 мм/год; по марке № 118 осадки стабильны в течение всего периода. Суммарные осадки по маркам нижней головы в разные периоды наблюдений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Осадки марок нижней головы шлюза № 2 ВБВП, мм

Период наблюдений	Марка 117	Марка 118	Марка 120	Марка 121
1984 г.	–12	–21	0	–16
2020 г.	–28	–38	–70	–24

а)



б)



Рис. 6. Осадки марок нижней головы шлюза № 2 ВБВП:
а — левого устоя; б — правого устоя

В 1985 г. в бетоне левого устоя нижней головы обнаружена трещина [18], размером в верхней части около 20 мм, на глубине 3 м трещина имела волосяной характер. В 1989 г. на трещине был установлен щелемер, наблюдения за развитием трещины показывают, что размер трещины в 2020 г. составил 38,2 мм. Очевидно, что трещина в бетоне возникла и развивается из-за различных направленности и интенсивности осадок левого и правого устоев нижней головы.

Начиная с 1981 г. было выполнено более десяти циклов цементации грунтов основания нижней головы, однако непроектные осадки головы и развитие трещины продолжают. В рамках ис-

следования [17] проводились инженерно-геологические изыскания и определение характеристик грунтов основания нижней головы шлюза № 2 ВБВП, в том числе были пробурены четыре скважины в окрестности нижней головы — рис. 7.

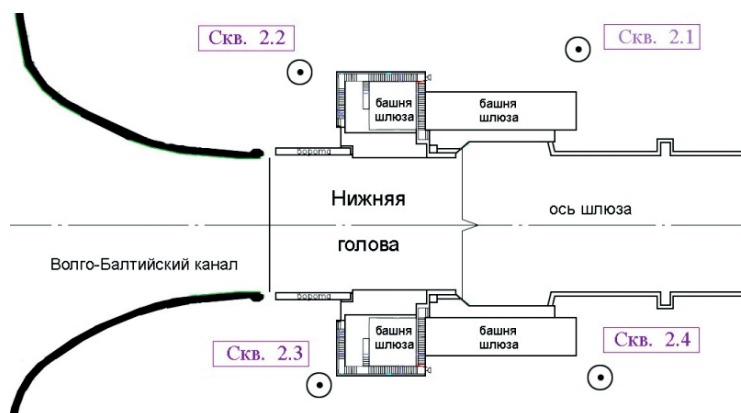


Рис. 7. Расположение скважин в окрестности нижней головы шлюза № 2 ВБВП

Гранулометрический состав грунтов в скважинах 2.1 и 2.4 приведен в табл. 3 [17].

Таблица 3

Гранулометрический состав (распределение частиц по размеру) проб грунта № 2 ВБВП

Номер скважины	Глубина отбора, м	Наименование грунта	Содержание частиц, %						
			Более 5,0 мм	5,0–2,0 мм	2,0–1,0 мм	1,0–0,5 мм	0,5–0,25 мм	0,25–0,10 мм	Менее 0,10 мм
2.1	2,0	Песок пылеватый, средней плотности, средней степени водонасыщения, однородный	1,6	0,4	0,4	1,6	18,8	45,9	31,3
2.1	4,0		1,3	0,4	0,2	1,3	19,6	51,7	25,5
2.1	8,0		0,3	0,2	0,4	1,3	13,5	58,2	26,1
2.1	10,0		0,4	0,1	0,5	1,6	19,1	48,9	29,4
2.1	12,0		2,5	0,3	0,3	1,2	10,5	55,0	30,2
2.1	14,0	Песок пылеватый, средней плотности, водонасыщенный однородный	0,1	0,1	0,1	1,0	7,4	51,9	39,4
2.1	16,0		0,0	0,0	0,3	1,2	8,2	51,8	38,5
2.1	18,0		0,0	0,0	0,4	0,9	6,9	61,5	30,3
2.1	20,0		0,9	0,3	0,3	0,7	7,5	55,3	35,0
2.1	22,0		1,2	0,4	0,3	0,7	5,3	54,0	38,1
2.1	24,0	Суглинок тяжелый, пылеватый, полутвердой консистенции, непросадочный, ненабухающий	5,1	1,8	5,0	16,4	20,9	23,0	27,8
2.1	26,0	Песок мелкий, средней плотности, водонасыщенный однородный, с прослойками суглинка до 8 см	0,0	0,0	0,1	0,1	21,8	68,0	10,0
2.1	28,0		0,0	0,0	0,2	0,8	24,2	67,9	6,9
2.1	32,0		0,0	0,0	0,3	1,0	45,7	43,6	9,4
2.1	34,0		0,0	0,0	0,2	0,6	39,7	50,9	8,6
2.1	36,0	Песок мелкий, средней плотности, водонасыщенный, однородный	0,0	0,0	0,1	0,3	41,3	50,0	8,3
2.1	38,0		0,0	0,0	0,1	0,1	42,6	49,8	7,4
2.1	40,0		0,0	0,0	0,2	0,3	38,5	52,3	8,7
2.1	42,0		0,0	0,0	0,1	0,1	24,4	68,0	7,4
2.4	2,0	Песок пылеватый, средней плотности, средней степени водонасыщения, однородный	0,0	2,2	12,9	6,8	14,0	39,5	24,6
2.4	4,0		0,0	0,0	4,2	1,4	1,5	63,7	19,2
2.4	6,0		0,0	0,0	2,3	0,7	14,4	59,9	22,7
2.4	8,0		0,0	5,1	6,1	10,8	3,5	51,4	23,1
2.4	10,0		0,0	5,7	3,6	4,9	15,7	45,8	24,3
2.4	12,0		0,0	0,8	0,1	0,7	7,5	67,3	23,6

Таблица 3
(Окончание)

2.4	14,0	Песок пылеватый, средней плотности, водонасыщенный, однородный	0,0	0,0	0,1	0,3	3,0	52,7	43,9
2.4	16,0		0,8	0,4	0,6	1,3	4,2	55,0	37,7
2.4	18,0		0,7	1,5	0,6	1,9	14,0	45,08	35,5
2.4	20,0		1,1	1,6	1,1	1,3	13,3	48,5	33,1
2.4	22,0		0,5	1,1	0,9	0,9	10,9	37,3	48,4
2.4	24,0	Суглинок тяжелый, пылеватый, полутвердой консистенции, непросадочный, ненабухающий	31,7	1,2	0,5	0,4	1,4	21,0	43,8
2.4	26,0	Песок мелкий, средней плотности, водонасыщенный, однородный с прослоями суглинка до 8 см	16,2	1,1	0,8	1,2	6,1	39,7	34,9
2.4	28,0		0,0	0,1	0,2	0,4	44,6	42,06	12,1
2.4	30,0		0,0	0,0	0,2	0,6	23,8	52,2	23,2
2.4	32,0		0,0	0,1	0,1	0,8	33,4	53,0	12,6
2.4	34,0	Песок мелкий, средней плотности, водонасыщенный, однородный	0,0	0,1	0,1	0,7	29,8	60,5	8,8
2.4	36,0		0,0	0,2	0,1	0,7	41,1	44,3	3,6
2.4	38,0		0,0	0,1	0,1	0,6	47,6	41,3	10,3
2.4	40,0		0,0	0,0	0,4	0,5	24,2	58,5	16,4
2.4	42,0		0,0	0,0	0,4	0,5	21,1	63,3	14,7

Видно, что грунты в основании нижней головы шлюза № 2 мелкие и пылеватые пески с тонкой прослойкой суглинка, которая находится на глубине 24,0–25,0 м от поверхности. При этом содержание в песке частиц размером менее 0,5 мм в скважине 2.1 составляет на разной глубине 96,0–99,8 %; в скважине 2.4–78,0–99,6 %.

Породы, вмещающие шлюз № 2 и его нижнюю голову, обводнены. Часть подземных вод (порово-пластовые) — безнапорные, в местах развития глинистых прослоев они приобретают незначительный напор. Подземные воды девонских отложений преимущественно напорные, пьезометрический напор превышает отметку подошвы камеры шлюза на 6,0 м. Подземные воды имеют тесную гидравлическую связь с поверхностными водами. На момент проведения изысканий (октябрь 2020 г.) в скважинах 2.2 и 2.3 (см. рис. 7) был вскрыт напорный горизонт грунтовых вод, установившийся на уровне 0,4–0,5 м выше земной поверхности. Среднее значение коэффициента фильтрации для напорного горизонта составило 1,17 м/сут. Участок шлюза № 2, в соответствии с нормами¹, характеризуется как постоянно подтопленный в естественных условиях.

Анализ степени гашения напора фильтрационных потоков [17] свидетельствует о том, что напорным фронтом верхней головы шлюза гасится в среднем всего 49,5 % общего напора на шлюз, что способствует проникновению воды из верхнего бьефа в грунты основания камеры и нижней головы. Очевидно, что в грунтах основания нижней головы шлюза № 2 ВБВП сформировались условия, необходимые для разжижения, а именно: грунты мелкие и пылеватые пески, полная водонасыщенность слоя, слабая водоотдача и низкие коэффициенты фильтрации.

В период с начала эксплуатации шлюза № 2 в грунтах основания нижней головы сформировались области разуплотнения различной конфигурации. Грунты в этих областях насыщались водой, плохой водоотвод способствовал их частичному разжижению. Это привело к неравномерной осадке левого и правого устоев нижней головы, векторы осадки устоев направлены в разные стороны: левый устой — на юго-восток; правый устой — на северо-запад. Такая несовместная работа левого устоя и днища нижней головы шлюза № 2 привела к возникновению трещины в бетоне. Поскольку процессы, протекающие в грунтах основания, не приостановлены, трещина в бетоне также продолжает развиваться.

¹ СП 11–105–97. Инженерно-геологические изыскания для строительства.

Обсуждение (Discussion)

Для предотвращения возникновения опасных для устойчивости, прочности и целостности гидротехнических сооружений зон разжижения грунтов имеются две возможности: предотвращение разжижения и уменьшение вредных последствий разжижения. Для исключения возможностей разжижения грунта необходимо исключить условия, при которых возникает разжижение. Прежде всего, необходимо максимально уменьшить водонасыщенность грунтов. При этом возможны два направления:

1. Предотвращение проникновения в грунты фильтрационных вод. Как отмечалось ранее, особенностью конструкции судоходных шлюзов является образование перепада уровня водотока, поддерживаемого напорным фронтом гидроузла. Это способствует созданию в грунтах основания значительных градиентов напора фильтрационных вод и существенному водонасыщению грунтов. Для предотвращения проникновения в грунт воды из верхнего бьефа возможно проведение следующих мероприятий:

- увеличение протяженности и усиление противофильтрационных свойств понура перед верхней головой шлюза, позволит удлинить пути фильтрации и снизить градиенты и скорости фильтрационного потока;

- создание противофильтрационной завесы в напорном фронте — обычно это устройство шпунтовой завесы слева и справа от верхней головы, доходящей снизу до водонепроницаемых слоев; создание противофильтрационного ядра-экрана в крыльях дамбы, формирующей напорный фронт;

- в особо сложных случаях возможно создание противофильтрационной шпунтовой завесы по контуру конструкций шлюза (голов и камеры).

Однако даже в случае предотвращения проникновения в грунт воды из верхнего бьефа негативную роль в процессах разжижения могут сыграть подземные грунтовые воды.

2. Уменьшение водонасыщенности грунтов основания путем удаления воды из массива грунта — дренирование. В данном случае возможно использование различных типов дренажных устройств: вакуумных иглофильтров, вертикального дренажа в виде перфорированных труб, заполненных материалом, поглощающим грунтовые воды, либо с откачкой поступающей воды.

Следует также исследовать возможность изменения гранулометрического состава и пористости грунта. Если на этапе проектных изысканий и начала строительства становится понятно, что состав и характеристики грунтов, степень их водонасыщенности, а также имеющиеся грунтовые воды создают предпосылки к разжижению грунтов, то можно рассмотреть возможность замены слоя естественных грунтов в основании сооружения техногенными грунтами. Именно так и было сделано при строительстве шлюза № 2 ВБВП — слой суглинка в основании нижней головы был заменен слоем песка мощностью 1,0–1,5 м. Однако при этом исходили из соображений обеспечения устойчивости сооружения, возможность разжижения этого слоя при значительном водонасыщении не учитывалась. Слой техногенного грунта должен предотвратить избыточное проникновение воды внутрь массива и обеспечить достаточную несущую способность для сооружения.

Для уменьшения вредных для сооружения последствий разжижения грунтов следует исключить возможность его непрочных осадок и перемещений даже при разжижении грунта. Необходимо рассмотреть возможность опирания конструкций сооружения на слои грунтов с высокой несущей способностью. Как правило, такие грунты (глины, плотные пески и т.п.) подстилают слои мелкозернистых несвязных водонасыщенных грунтов, подверженных разжижению. При этом, конечно, имеет значение глубина расположения плотных слоев. Как показывает практика, в частности, ситуация на шлюзе № 5 Волго-Донского судоходного канала, зачастую такие слои располагаются на глубине 10–20 м от подошвы сооружения.

Для переноса нагрузки от массивных конструкций сооружения на более прочные грунты возможно устройство, например, свайного ростверка. Сооружение должно опереться на сваи через специальные узлы сопряжения. Сваи необходимо заглубить в слой плотного грунта. Для условий возведения сооружений в водонасыщенной среде возможно использование буронабивных или щебеночных свай. Конструкция таких свай позволяет их возведение как с сухой территории,

так и с акватории (в окрестности голов шлюзов). Бурунабивные сваи после укладки в них бетонной смеси предполагают извлечение трубы. Как бетонные, так и щебеночные сваи позволяют дополнительно увеличить свою несущую способность за счет трения между свай и окружающим песчаным массивом.

Заключение (Conclusion)

Непроектные осадки и перемещения конструкций судоходных гидротехнических сооружений зачастую могут быть вызваны явлениями разжижения грунтов, однако такая возможность не учтена в отечественной нормативной литературе.

Разжижению грунтов способствует наличие в основании сооружений, расположенных, как правило, в долинах водотоков несвязных мелкодисперсных грунтов. В таких грунтах обычно существуют водоносные горизонты, зачастую с напорными грунтовыми водами. После возведения подпорных конструкций и создания напорного фронта гидроузла грунты основания дополнительно насыщаются фильтрационными водами со значительными градиентами напора. При отсутствии или затруднении водоотведения из массивов грунта в них формируются условия для разжижения. Как показал анализ, неучет возможности разжижения грунтов может привести к нарушению нормальной работы сооружения и порой к аварийным ситуациям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.: Изд-во «Юрайт», 2020.— 430 с.
3. *Вознесенский Е. А.* Разжижение грунтов при циклических нагрузках / Е. А. Вознесенский и [др].— М.: Изд-во МГУ, 2005.— 134 с.
4. *Huang Y.* Hazard analysis of seismic soil liquefaction / Y. Huang, M. Yu.— Singapore: Springer, 2017.— 165 p. DOI: 10.1007/978-981-10-4379-6.
5. *Lade P. V.* Physics and mechanics of soil liquefaction / P. V. Lade, J. A. Yamamuro.— Routledge, 2018.— 385 p.
6. *Jefferies M.* Soil liquefaction: a critical state approach / M. Jefferies, K. Been.— CRC Press, 2020.— 676 p.
7. *Болдырев Г. Г.* Оценка потенциала грунтов к разжижению / Г. Г. Болдырев, И. Х. Идрисов // Геоинфо [Электронный ресурс].— Режим доступа: <https://www.geoinfo.ru/product/boldyrev-gennadij-grigorevich/osenka-potenciala-gruntov-k-razzhizheniyu-40984.shtml> (дата обращения: 20.07.2021).
8. *Вознесенский Е. А.* Землетрясения и динамика грунтов / Е. А. Вознесенский // Соросовский образовательный журнал.— 1998.— № 2.— С. 101–108.
9. *Chávez V.* An experimental method to verify the failure of coastal structures by wave induced liquefaction of clayey soils / V. Chávez, E. Mendoza, R. Silva, A. Silva, M. A. Losada // Coastal Engineering.— 2017.— Vol. 123.— Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2017.02.002.
10. *Chang W. J.* Liquefaction characteristics of gap-graded gravelly soils in K0 condition / W. J. Chang, C. W. Chang, J. K. Zeng // Soil Dynamics and Earthquake Engineering.— 2014.— Vol. 56.— Pp. 74–85. DOI: 10.1016/j.soildyn.2013.10.005.
11. *Колосов М. А.* Лабораторные исследования просадочных свойств крупнообломочных материалов / М. А. Колосов // Тр. ЛИВТ.— Л.: ЛИВТ, 1973.— Ч. III.— С. 178–188.
12. *Wang Y.* Post-liquefaction shearing behaviour of saturated gravelly soils: Experimental study and discrete element simulation / Y. Wang, Y. Wang, L. Kong, Z. Sun // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.— 2020.— Vol. 12.— Is. 5.— Pp. 1119–1130. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.01.007.
13. *Болдырев Г. Г.* Руководство по интерпретации данных испытаний методами статического и динамического зондирования для геотехнического проектирования / Г. Г. Болдырев.— М.: Изд-во ООО Прондо, 2017.— 476 с.
14. *Shibata T.* Evaluation of liquefaction potentials of soils using cone penetration tests / T. Shibata, W. Terakasa // Soils and Foundations.— 1988.— Vol. 28.— Is. 2.— Pp. 49–60. DOI: 10.3208/sandf1972.28.2_49.

15. Проведение исследовательских работ, поверочно-теоретических расчетов прочности и устойчивости конструкций шлюзов № 5, 10, 11–13, 15, грунтовой дамбы № 74, напорного трубопровода № 34 насосной станции № 32 Волго-Донского судоходного канала с целью установления фактического технического состояния, запасов прочности и несущей способности сооружений и оборудования, разработка критериев безопасности: Отчет о НИР.— СПб.: ФГБОУ ВПО «СПГУВК», 2008.— 131 с.

16. Проведение наблюдений и специальных исследований за шлюзом № 5 после выполненных работ по укреплению грунтов основания для разработки рекомендаций по проведению работ по укреплению основания шлюза № 6 Волго-Донского судоходного канала: Отчет о НИР (заключ.).— СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2020.— 193 с.

17. Проведение исследовательских работ по выяснению причин образования и развития трещин в устоях нижних голов шлюзов № 2, 3, 4 ФБУ «Администрация «Волго-Балт» и разработка научно-обоснованных рекомендаций по восстановлению несущей способности бетонных конструкций нижних голов шлюзов. Этап I: Отчет о НИР (промежуточ.). — М.: АО «Акватик», 2021.— 320 с.

18. Лунев Е. А. Расчет напряженно-деформированного состояния трещины в устье нижней головы шлюза № 2 Белоусовского гидроузла / Е. А. Лунев, К. П. Моргунов, Г. Г. Рябов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.— 2018.— Т. 10.— № 3.— С. 533–546. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-533-5.

REFERENCES

- Ivanov, P. L. *Gruntы i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy*. M.: Vysshaya shkola, 1985.
- Kramarenko, V. V. *Soil science*. M.: Yurayt Publishing House. 2020.
- Voznesenskii, E. A., V. G. Kovalenko, E. S. Kushnareva, and V. V. Funikova. *Razzhizhenie gruntov pri tsiklicheskh nagruzkakh*. M.: Izd-vo MGU, 2005.
- Huang, Yu, and Miao Yu. *Hazard analysis of seismic soil liquefaction*. Singapore: Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-981-10-4379-6.
- Lade, Poul V., and Jerry A. Yamamuro, eds. *Physics and mechanics of soil liquefaction*. Routledge, 2018.
- Jefferies, Mike, and Ken Been. *Soil liquefaction: a critical state approach*. CRC press, 2020.
- Boldyrev, G. G., and I. Kh. Idrisov. "Otsenka potentsiala gruntov k razzhizheniyu." *Geoinfo*. Web. 20 July 2021 <<https://www.geoinfo.ru/product/boldyrev-gennadij-grigorevich/ocenka-potenciala-gruntov-k-razzhizheniyu-40984.shtml>>.
- Voznesenskii, E. A. "Zemletryaseniya i dinamika gruntov." *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal* 2 (1998): 101–108.
- Chávez, Valeria, Edgar Mendoza, Rodolfo Silva, Anahí Silva, Miguel A. Losada. "An experimental method to verify the failure of coastal structures by wave induced liquefaction of clayey soils." *Coastal Engineering* 123 (2017): 1–10. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2017.02.002.
- Chang, Wen-Jong, Chi-Wen Chang, and Jhang-Kai Zeng. "Liquefaction characteristics of gap-graded gravelly soils in K0 condition." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 56 (2014): 74–85. DOI: 10.1016/j.soildyn.2013.10.005.
- Kolosov, M. A. "Laboratornye issledovaniya prosadochnykh svoystv krupnooblomochnykh materialov." *Trudy LIVT*. Chast' III. L.: LIVT, 1973. 178–188.
- Wang, Yong, Yanli Wang, Lingwei Kong, and Zhiliang Sun. "Post-liquefaction shearing behaviour of saturated gravelly soils: Experimental study and discrete element simulation." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 12.5 (2020): 1119–1130. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.01.007.
- Boldyrev, G. G. *Rukovodstvo po interpretatsii dannykh ispytaniy metodami staticheskogo i dinamicheskogo zondirovaniya dlya geotekhnicheskogo proyektirovaniya*. M.: Prondo, 2017.
- Shibata, Toru, and Wanchai Teparaksa. "Evaluation of liquefaction potentials of soils using cone penetration tests." *Soils and Foundations* 28.2 (1988): 49–60. DOI: 10.3208/sandf1972.28.2_49.
- Provedeniye issledovatel'skikh rabot, poverochno-teoreticheskikh raschetov prochnosti i ustoychivosti konstruktsey shlyuzov № 5, 10, 11, 12, 13, 15, gruntovoy damby № 74, napornogo truboprovoda № 34 nasosnoy stantsii № 32 Volgo-Donskogo sudokhodnogo kanala s tsel'yu ustanovleniya fakticheskogo tekhnicheskogo sostoyaniya, zapasov prochnosti i nesushchey sposobnosti sooruzheniy i oborudovaniya, razrabotka kriteriyev bezopasnosti. Research report. SPb.: SPGUVK, 2008.

16. *Provedeniye nablyudeniya i spetsial'nykh issledovaniy za shlyuzom № 5 posle vypolnennykh rabot po ukrepleniyu gruntov osnovaniya dlya razrabotki rekomendatsiy po provedeniyu rabot po ukrepleniyu osnovaniya shlyuza № 6 Volgo-Donskogo sudokhodnogo kanala.* Research report. SPb.: Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2020.

17. *Provedeniye issledovatel'skikh rabot po vyyasneniyu prichin obrazovaniya i razvitiya treshchin v ustoyakh nizhnikh golov shlyuzov №№ 2, 3, 4 FBU «Administratsiya «Volgo-Balt» i razrabotka nauchno-obosnovannykh rekomendatsiy po vosstanovleniyu nesushchey sposobnosti betonnykh konstruktsey nizhnikh golov shlyuzov.* Research report. M.: JSC "Aquatic", 2021.

18. Lunev, Evgeny A., Konstantin P. Morgunov, and Georgiy G. Ryabov. "Calculation of stress-deformed condition of crack in the state of the lower head of the class 2 of the Belousovsky hydroelectric power station." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 533–546. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-533-5.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

*Статья поступила в редакцию 26 июля 2021 г.
Received: July 26, 2021.*