

ASSESSING THE RESULTS OF WORK ON STRENGTHENING THE SOILS OF THE FOUNDATION OF LOCK № 5 OF THE VOLGA-DON SHIPPING CANAL AND PROPOSALS FOR STABILIZING THE CHAMBER POSITION

K. P. Morgunov

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

The results of work to strengthen the soil foundation of the chamber of lock № 5 of the Volga-Don Shipping Canal, carried out in 2016–2017, are analyzed. The need to carry out work to strengthen the soil was caused by an increase in the intensity of sedimentation of the central sections of the lock chamber, which began in 2005. To stabilize the chamber position, the technology of two-component jet grouting is implemented. This technology assumes the formation of several longitudinal soil-cement walls in the soils of the lock chamber base, which would transfer the load from the weight of the chamber to the harder clay soils of the water-resistant layer. However, as a result of the work performed, the precipitation intensity has increased. Engineering-geological, hydrological and geophysical studies conducted in 2018–2020 recorded the absence of formed soil-cement elements in the soils of the chamber base. An analysis of the soil samples characteristics taken from the chamber base has showed that a layer of soils of 10–12 m thickness is composed of loess rocks, below which water-resistant clayey rocks lie. Initially, there were several confined and non-confined aquifers in the soils of the lock base, and the creation of a hydroelectric complex and the formation of a level difference between the upper and lower pools led to the formation of a filtration flow with a significant pressure gradient at the base of the chamber. An analysis of the properties and structure of loess soils has showed their predisposition to subsidence, transition to a floating state and liquefaction with an increase in water content. Under the conditions of weak water-saturated loess soils, the supply of a cement mixture into them under significant pressure did not lead to the formation of soil-cement elements. Thus, in accordance with the current regulatory documents, the technical condition of the gateway is defined as pre-emergency, and the security level is defined as unsatisfactory. Methods for reducing the intensity of the chamber sedimentation such as cutting through the loess layer with piles, physical and chemical strengthening of soils and water protection of the massif at the base of the chamber are considered and evaluated.

Keywords: shipping lock, loess soil, filtration flow, bored and crushed stone piles, soil silicification.

For citation:

Morgunov, Konstantin P. “Assessing the results of work on strengthening the soils of the foundation of lock № 5 of the Volga-Don shipping canal and proposals for stabilizing the chamber position.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 806–819. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-806-819.

УДК 624.131.431.3; 626.45

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ ПО УКРЕПЛЕНИЮ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ШЛЮЗА № 5 ВОЛГО-ДОНСКОГО СУДОХОДНОГО КАНАЛА И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ЕГО КАМЕРЫ

К. П. Моргунов

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

Выполнен анализ результатов работ по укреплению грунтов основания камеры шлюза № 5 Волго-Донского судоходного канала, проведенных в 2016–2017 гг. Отмечается, что необходимость проведения работ по укреплению грунтов была вызвана увеличением интенсивности осадок центральных секций камеры шлюза, начавшейся в 2005 г. Для стабилизации положения камеры реализована технология двухкомпонентной струйной цементации, предполагающая формирование в грунтах основания камеры шлюза нескольких продольных грунтоцементных стен, которые могут передать нагрузку от веса камеры на более твердые

глинистые грунты водоупорного слоя. Однако в результате выполненных работ интенсивность осадок увеличилась. В результате проведенных инженерно-геологических, гидрологических и геофизических исследований, выполненных в 2018–2020 гг., было зафиксировано отсутствие в грунтах основания камеры сформировавшихся грунтоцементных элементов. Анализ характеристик проб грунтов, отобранных из основания камеры, показал, что слой грунтов толщиной 10–12 м сложен из лёссовых пород, ниже которых залегают глинистые водоупорные породы. В грунтах основания шлюза изначально имелось несколько напорных и безнапорных водоносных горизонтов, а создание гидроузла и формирование перепада уровней между верхним и нижним бьефами обусловило наличие в основании камеры фильтрационного потока со значительным градиентом напора. Анализ свойств и структуры лёссовых грунтов показал их предрасположенность при увеличении водосодержания к просадкам, переходу в плавунное состояние и разжижению. В условиях слабых водонасыщенных лёссовых грунтов подача в них цементной смеси под значительным давлением не привела к формированию грунтоцементных элементов. Таким образом, в соответствии с действующими нормативными документами, техническое состояние шлюза определяется как предаварийное, а уровень безопасности — как неудовлетворительный. Выполнена оценка способов уменьшения интенсивности осадок камеры: прорезка лёссовой толщи сваями, физико-химическое укрепление грунтов и водозащита массива в основании камеры.

Ключевые слова: судоходный шлюз, лёссовый грунт, фильтрационный поток, буронабивные и щебеночные сваи, силикатизация грунта, гидроузел, камера шлюза.

Для цитирования:

Моргунов К. П. Оценка результатов работ по укреплению грунтов основания шлюза № 5 Волго-Донского судоходного канала и предложения по стабилизации положения его камеры / К. П. Моргунов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 806–819. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-806-819.

Введение (Introduction)

Трасса Волго-Донского судоходного канала, в соответствии с проектом [1], [2], была проложена по местности со спокойным рельефом по наиболее низким отметкам. Основными критериями выбора расположения трассы канала, соединяющего Волгу и Дон, являлись его наименьшая длина и водообеспеченность. Обстоятельством, предполагающим снижение объемов работ и их стоимости, являлось то, что канал пересекает водораздел в наиболее удовлетворительных геологических условиях. После выхода из Волги через Сарептский затон канал девятью однокамерными шлюзами по долине реки Сарпы и балке Солянка поднимается на водораздел между Волгой и Доном. Общая длина этого участка составляет 21 км, напор на шлюз № 1 — 11,4 м, на шлюзы № 2–9 — по 10,4 м. При этом вначале проектировщикам, а затем и строителям пришлось прокладывать сооружения канала в грунтах, свойства которых не всегда обеспечивали необходимые условия для эффективной эксплуатации этих сооружений. В значительной мере это относится, прежде всего, к району расположения гидроузлов шлюзов № 5 и 6. Эти гидроузлы расположены на волжском склоне канала, в тальвеге балки Солянка в устьевой, наиболее суженной ее части, на расстоянии 14,5 км от начала трассы канала (шлюз № 5), на расстоянии 2,4 км друг от друга. Именно структура и свойства грунтов, залегающих в основании шлюзов № 5 и № 6, привели в дальнейшем, как показали наблюдения, к проблемам, существенно осложнившим эксплуатацию гидросооружений и, прежде всего, к сверхпроектным осадкам центральных секций камеры шлюза. Для уменьшения интенсивности этих осадок на гидроузле шлюза № 5 был выполнен цикл работ по укреплению грунтов основания камеры.

Целью статьи является оценка результатов работ по укреплению грунтов основания камеры и выработка предложений по стабилизации положений ее конструкции.

Методы и материалы (Methods and Materials)

По конструкции шлюз № 5 — типовой шлюз Волго-Донского судоходного канала: однокамерный однопольный, с железобетонной разрезной камерой, состоящей из семи секций, отделенных от голов шлюза и друг от друга температурно-осадочными швами — рис. 1. Камера разрезана по оси сквозным швом, защищенным противотеплоизоляционной шпонкой. Ее левая и правая части (полусекции) симметричны, каждая из них представляет жестко соединенные между собой стенку, днищевую и тыловую консоли переменных профилей.

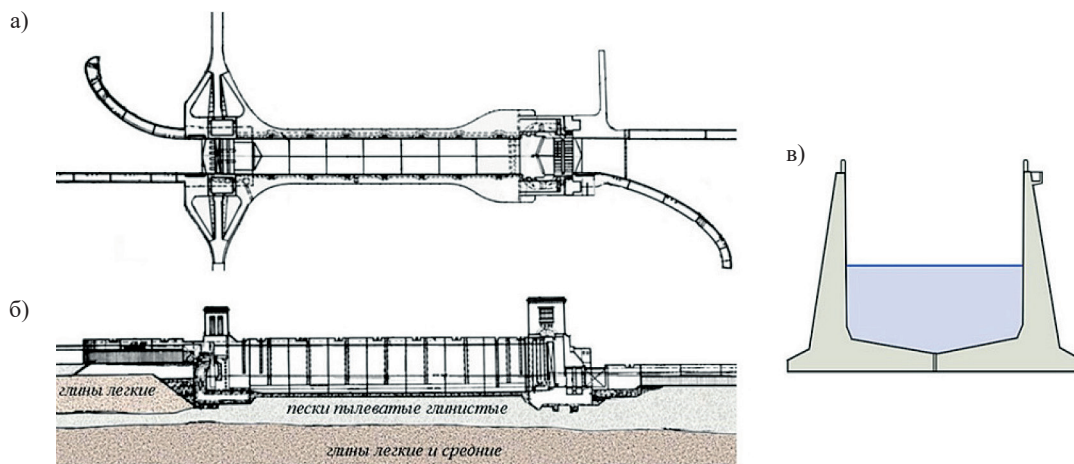


Рис. 1. Схема шлюза № 5:
а — план; б — продольный разрез; в — разрез по секции камеры

В соответствии с действующими нормативными документами [3] на шлюзе начиная с момента его строительства, регулярно проводился мониторинг параметров, определяющих безопасность сооружения, в частности контролировались вертикальные перемещения (осадки) конструкций. Осадки по всем конструкциям шлюза № 5 (головы и секции) до 2005 г. не превышали 0,5 мм/год, не выходя за предельно допустимые значения, установленные в соответствии с декларациями безопасности — не более 1 мм/год. Начиная с 2005 г. вертикальные перемещения некоторых конструкций шлюза увеличились. В период 2006–2013 гг. интенсивность осадок по 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. Интенсивность осадки остальных секций и голов шлюза не выходила за допустимые значения. В результате проведения натурных исследований, наблюдений и научно-исследовательских работ, выполненных после обнаружения сверхнормативных осадок конструкций шлюза [4], были установлены причины таких осадок. Определяющим фактором оказались свойства грунтов основания камеры шлюза № 5, которые характеризуются низкими прочностными показателями и высокой сжимаемостью под нагрузкой.

По данным исследований, выполненных на этапе проектирования гидроузла, шлюз № 5 врезан в современные аллювиальные отложения, которые подстилаются породами нижнебакинского горизонта четвертичной системы. В основании конструкций шлюза № 5 залегают водоносные супеси нижнебакинского горизонта мощностью 4–8 м. Нижнебакинский горизонт подстилается легкими и средними суглинками андреевской свиты, под ними находятся легкие и средние супеси и легкие суглинки онкофорового горизонта. Большая часть днища камеры врезается в толщу легких водонасыщенных супесей нижнебакинского горизонта, близких по своему составу к пылеватым тонкозернистым пескам. Отложения нижнебакинского горизонта представлены в верхней части супесями пылеватыми, пластичными, с прослоями глины тугопластичной и линзами песка, в нижней части глинами мягко- и тугопластичными, с прослоями песка мелкого, водонасыщенного. Мощность супесей 5,9–7,7 м. Мощность глин составляет 3,0–5,9 м. Отложения нижнебакинской свиты подстилаются толщей супесей, суглинков и глин андреевской свиты.

По итогам исследований, выполненных в 2008–2010 гг., были сформулированы предложения по укреплению грунтов основания шлюза методом струйной цементации, на основании которых был разработан проект работ по укреплению основания камеры шлюза [5]. Проект предполагал усиление грунтов основания камеры шлюза путем армирования грунтоцементными элементами, изготовленными с использованием двухкомпонентной технологии струйной цементации. Предусматривалось также устройство противодиффузионной завесы в дамбе, формирующей напорный фронт гидроузла и отделяющей территорию гидроузла от водохранилища верхнего бьефа, созданием в массиве дамбы грунтоцементных элементов.

Технология укрепления грунтов основания камеры заключалась в устройстве из обратной засыпки камеры наклонных скважин под днище глубиной до глинистого водоупорного слоя с заглублением в водоупор на 0,5 м и подачей в них цементного раствора под давлением 45 МПа. Кроме того, по аналогичной технологии должны были быть выполнены вертикальные скважины через днище камеры. Работы были проведены в 2016–2017 гг. Всего было устроено 860 скважин из обратной засыпки и 130 скважин в днище камеры. Предполагалось, что в результате в грунте под тыловыми консолями стен камеры будут сформированы две продольные грунтоцементные стенки шириной не менее 300 см, а также две продольные стенки под днищем камеры на расстоянии около 6 м от центральной осевой шпонки, которые упершись в слой водоупора, зафиксируют положение камеры шлюза в слое водоупора, прекратив ее осадки.

Результаты (Results)

Во время выполнения работ в 2016 г. интенсивность осадок конструкций камеры резко возросла — до 26 мм/год. С началом навигации 2017 г. интенсивность осадок конструкций еще более увеличилась — по левой стороне секции IV до 59 мм/год, по правой — до 64 мм/год (рис. 2).

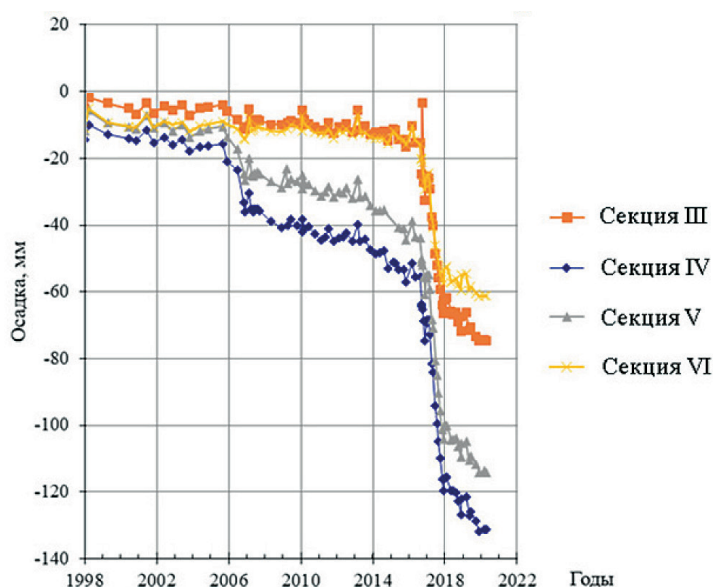


Рис. 2. Осадки секций камеры шлюза № 5

С началом выполнения работ увеличились горизонтальные отклонения верха стен камеры в сторону засыпки. За период с июня 2016 г. по июнь 2017 г. для центральных секций камеры они составили: по секции III — 46 мм; по секции IV — 24 мм; по секции V — 14 мм. В последующие годы интенсивность осадок конструкций камеры шлюза несколько уменьшилась, однако при этом она существенно превышала величины, определенные критериями безопасности. По центральным секциям камеры шлюза (секции III, IV, V) интенсивность осадки составила 5,5–7,0 мм/год, осадки остальных секций происходили с интенсивностью 1,0–3,5 мм/год.

Несмотря на комплекс выполненных работ по укреплению грунтов основания, целью которых являлась стабилизация положения камеры шлюза, в соответствии с действующими нормативными документами [6] техническое состояние шлюза № 5 ФБУ «Администрация «Волго-Дон» было определено как предаварийное, а уровень безопасности — как неудовлетворительный.

В 2018–2020 гг. на шлюзе № 5 были выполнены научно-исследовательские работы по оценке результата реализации проекта по укреплению грунтов основания шлюза № 5 [7]. В результате проведения комплекса инженерно-геологических, гидрологических, геофизических исследований было установлено, что выполненные работы по укреплению основания камеры шлюза № 5 грунтоцементными элементами по методу Jet Grauting не дали ожидаемого результата. Исследования,

в том числе контрольное бурение скважин в местах предполагаемого расположения грунтоцементных элементов и анализ отобранных образцов грунтов, показали отсутствие сформировавшихся грунтоцементных элементов в верхней зоне основания. Выполненное в процессе исследований георадарное сканирование грунтов в основании камеры шлюза также не зафиксировало наличия сформировавшихся грунтоцементных структур. Анализ данных выполненных исследований позволил уточнить характер грунта в основании камеры шлюза № 5: на глубине около 10,0 м от отметки днища камеры залегает водоупор — глина, а весь слой между днищем и водоупором заполнен весьма водонасыщенным грунтом — песком пылеватым, зеленовато-серым, с линзами суглинка, текучей супеси.

На основе полученных результатов исследования был сделан вывод о том, что наличие в грунтах основания постоянного фильтрационного потока с весьма значительным градиентом, направленного как от верхнего бьефа к нижнему, так и в диагональном направлении (боковая фильтрация), не позволило сформироваться грунтоцементным элементам, закачиваемая в скважины цементная смесь вымывалась фильтрационным потоком до момента схватывания. Такой отрицательный результат работ по укреплению грунтов основания шлюза № 5 свидетельствует о недооценке состояния грунтового массива и фильтрационных потоков в нем на этапе разработки проекта и приводит к необходимости более тщательного и детального анализа ситуации для выработки действенного метода стабилизации положения камеры шлюза.

В процессе проведения исследований [7] лабораторными методами определялись физико-механические свойства грунтов (на образцах ненарушенной и нарушенной структуры); испытания грунтов выполнялись в соответствии с действующими методиками и ГОСТами. Всего на гидроузле шлюза № 5 пробы грунта были взяты из одиннадцати скважин: скважины 1–9 были пробурены через днище камеры, скважина 10 — в обратной засыпке в районе верхней головы шлюза, скважина 11 — в обратной засыпке у нижней головы (см. рис. 3). При этом скважины устраивались как в массиве грунтов основания, так и в местах, в которые было произведено закачивание цементного раствора и предполагалось формирование грунтоцементных элементов.

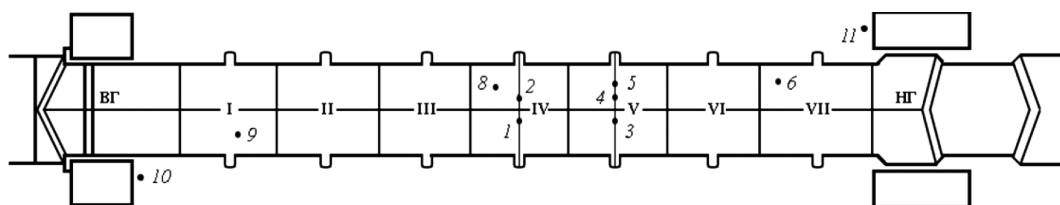


Рис. 3. Схема расположения скважин на шлюзе № 5:
I–VII — номера секций камеры; 1–11 — номера скважин

Для глинистых грунтов по образцам в лабораторных условиях определялись: естественная влажность, верхний и нижний пределы пластичности, плотность в природном сложении, плотность частиц грунта, гранулометрический состав ситовым и ареометрическим методами. Расчетным методом определялись показатель текучести, коэффициент пористости и коэффициент водонасыщения. Из физико-механических свойств определялись показатели прочностных свойств методом одноплоскостного среза (консолидированно-дренированные испытания при природной влажности). Показатели деформационных свойств определялись методом компрессионного сжатия с конечной нагрузкой до 0,3 МПа без разгрузки (в естественном состоянии). Расчет модуля деформации был выполнен для интервала нагрузок 0,1–0,2 МПа с применением поправочных коэффициентов mk . Для песков определялись следующие показатели: гранулометрический состав ситовым методом с промывкой; природная влажность, плотность и коэффициенты фильтрации в максимально плотном и предельно рыхлом сложениях; углы внутреннего трения. Расчетным способом определялись коэффициенты пористости в максимально плотном и предельно рыхлом сложениях и коэффициент водонасыщения. О состоянии грунта в основании камеры шлюза свидетельствует тот факт, что при бурении скважин из них начинался интенсивный излив водно-грунтовой пульпы — рис. 4 и 5.



Рис. 4. Излив водно-грунтовой пульпы из скважины при бурении (фото автора)



Рис. 5. Консистенция пробы грунта, извлеченного из скважины (фото автора)

При исследовании грунтов в лаборатории было выявлено, что грунты из скважин, пробуренных в местах закачивания цементного раствора, и грунты из других скважин по физическим показателям практически не отличаются, что свидетельствует о том, что закачанная в скважины смесь не сформировала ожидаемых грунтоцементных элементов. В одной из скважин (в скважине № 5) зафиксировано слабое наличие грунтоцементного раствора в виде небольших единичных включений галечника слабоокатанного слабосцементированного, который легко рассыпался при небольшом усилии. В скважине № 6 грунтоцементный раствор оказался в виде песка гравелистого с включением до 25 % галечника слабоокатанного слабосцементированного. Гранулометрический состав грунтов (распределение частиц по размеру) по некоторым скважинам представлен в таблице.

Гранулометрический состав проб грунта

Номер скважины	Глубина отбора, м	Наименование грунта по ГОСТу 25100–2011	Размеры частиц, мм								
			>10,0	10,0–5,0	5,0–2,0	2,0–1,0	1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,10	0,10–0,05	0,05–0,01
			Содержание частиц, %								
1	2,5	Песок пылеват. неоднород.	0	0	0,5	0,2	0,6	0,4	15,3	83	0
1	4,5	>>	0	3	3,3	2,4	6	1,2	13,6	70,5	0
1	7,0	>>	0	0	1,1	1,1	4,6	4,2	16,4	72,6	0
3	3,0	>>	0	0	0	0	0,4	0,4	23,3	75,9	0
3	7,0	>>	0	0	0,5	0,1	0,4	0,3	22,5	76,2	0
5	4,0	>>	0	0,1	0,8	0,6	1,8	1,6	16,7	78,4	0
5	7,0	>>	0	0,2	1,2	0,5	1,5	1,2	14,6	80,8	0
5	10,0	>>	0	0	1,2	0,5	0,8	1,5	15,3	80,7	0
10	2,0	Песок средней крупности неоднород.	0	6,0	2,1	9,9	13,8	41,5	25,0	1,7	10
10	4,0	>>	0	0,0	5,2	18,6	20,6	36,8	15,6	3,2	10
10	6,0	>>	0	0,0	7,5	20,8	20,0	37,8	12,0	1,9	10
10	8,0	>>	0	0,0	3,2	13,1	21,4	38,7	15,6	8,0	10
10	10,0	>>	0	0,0	5,5	15,4	12,1	37,4	20,1	9,5	10
10	12,0	>>	0	0,8	2,8	6,2	17,0	45,9	24,9	2,4	10
10	14,0	>>	0	0,4	2,3	5,5	15,4	45,6	28,2	2,6	10
10	14,8	>>	0	1,0	1,7	5,7	12,5	38,5	29,1	11,5	10
11	3,0	>>	0	2,8	4,9	21,5	14,2	39,2	13,9	3,5	11
11	5,0	>>	0	0,0	4,9	19,8	22,5	40,2	11,8	0,8	11
11	7,0	>>	0	0,1	1,8	3,9	15,8	43,4	33,7	1,3	11

В таблице приведены данные по скважинам № 1, 3, 5, устроенным в наиболее проблемных секциях IV и V камеры (см. рис. 3), а также по скважинам № 10 и 11, расположенным в обратной засыпке. Поскольку скважины № 10 и 11 пройдены в техногенных грунтах, состав грунтов в них отличается от грунтов в основании камеры шлюза. Анализ характеристик грунтов, залегающих в основании шлюза, позволяет сделать заключение о том, что их можно характеризовать как лёссовые.

Обсуждение (Discussion)

По поводу трактовки терминов «лёсс» и «лёссовый грунт» у специалистов существуют разногласия [8], [9]. В настоящее время принято объединять лёсс и многочисленные разновидности лёссовых грунтов термином «лёссовые породы». При этом очень часто между ними не делают различия, поскольку порой их сложно разделить между собой. В ГОСТе 25100–82 «Грунты. Классификация»¹ дано следующее определение: «...грунт лёссовый — пылеватоглинистый грунт, содержащий по гранулометрическому составу более 50 % пылеватых частиц (размером 0,05–0,005 мм), легко- и среднерастворимые соли и карбонаты кальция; однородный, преимущественно макропористый; в маловлажном состоянии способен держать вертикальный откос; при замачивании маловлажный лёссовый грунт дает просадку, легко размокает и размывается, а при полном водонасыщении может переходить в плавунное состояние».

Следует отметить, что термина «лёсс» в этом документе нет, используется понятие «лёссовый грунт». В следующих редакциях этого ГОСТа (ГОСТ 25100–95, ГОСТ 25100–2011, ГОСТ 25100–2020) термины «лёсс», «лёссовый грунт», «лёссовые породы» отсутствуют, они заменены термином «просадочный глинистый грунт», что многими специалистами (например, [10]–[12]) воспринято негативно. Между тем следует дифференцировать понятия «лёсс» и «лёссовые породы», так как они различаются по структуре и гранулометрическому составу. В целом это песчано-глинисто-пылеватые грунты, содержащие более 50 % частиц размером менее 0,05 мм, обладающие высокой пористостью [13]. Лёссы более однородны по составу, для них характерны высокое содержание (более 70–80 %) тонкопесчаных (0,1–0,05 мм) и крупнопылеватых (0,05–0,01 мм) частиц, малое количество частиц крупнее 0,25 мм и наличие глинистой фракции, которая обычно не превышает 16 %. Лёссовые породы характеризуются более разнообразным гранулометрическим составом. Выделяют лёссовидные суглинки, лёссовидные супеси, лёссовидные пески и лёссовидные глины. Гранулометрический состав лёссовых пород колеблется от легких пылеватых супесей и мелкозернистых пылеватых песков до глин. В большинстве случаев, лёссовые породы представлены пылеватыми суглинками, в составе которых содержится 50–80 % пылеватых частиц диаметром 0,05–0,002 мм, 3–30 % составляют глинистые частицы (менее 0,002 мм), до 15 % мелкопесчаных частиц (0,05–0,25 мм) и не более 5 % составляют частицы крупнее 0,25 мм.

Важным свойством как лёссов, так и лёссовых пород является их высокая пористость в сухом состоянии, способствующая существенной просадочности таких грунтов при их увлажнении. При этом просадочность лёссовых пород выражена менее четко, чем лёссов. Просадочность таких пород при их увлажнении определяется строением и взаимным расположением их структурных элементов. Как известно, вода в грунтах может находиться в следующих состояниях [13], [14]:

- *гигроскопическая вода*, обволакивающая частицу грунта слоем толщиной в одну молекулу и находящаяся под действием только молекулярных сил;
- *пленочная вода*, обволакивающая частицы грунта, но не заполняющая полностью поры между ними; эта вода может перемещаться в грунте под действием молекулярных сил и сил тяжести, не передавая гидростатического давления;
- *капиллярная вода*, которая заполняет мелкие поры грунта и находится под действием сил поверхностного натяжения и сил тяжести, передавая гидростатическое давление;
- *свободная гравитационная вода*, которая полностью заполняет все поры грунта, передает гидростатическое давление и перемещается под действием силы тяжести.

¹ ГОСТ 25100–82. Грунты. Классификация. Утв. и введ. в действ. Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 31 декабря 1981 г. № 284, прил. 1. С. 7.

Если грунт находится в маловлажном состоянии и в нем имеется лишь гигроскопическая (прочносвязанная) вода, то он представляет собой материал, обладающий значительным сопротивлением механическим воздействиям. Водные оболочки прочносвязанной воды являются настолько плотными, что они сопротивляются сжатию, сдвигу и растяжению как твердые тела, поэтому грунт в таком состоянии обладает упругостью, высоким сопротивлением сжатию и сдвигу.

При повышении содержания влаги в грунте в нем появляется пленочная (слабосвязанная) вода. При дальнейшем увлажнении грунт может иметь полностью сформированные оболочки молекулярно связанной воды и, кроме того, в нем может находиться вода в свободном от молекулярного воздействия состоянии. В этом случае песчаные и крупнопылеватые частицы как бы плавают в общей коллоидной массе, непосредственно не контактируя друг с другом. Структурные элементы лёссовых пород представляют собой глобулярные агрегаты, состоящие из первичных минеральных частиц (кварц, полевой шпат), покрытых несплошным («дырчатым») слоем тонкодисперсного вещества, как правило, кальцитового состава — рис. 6.

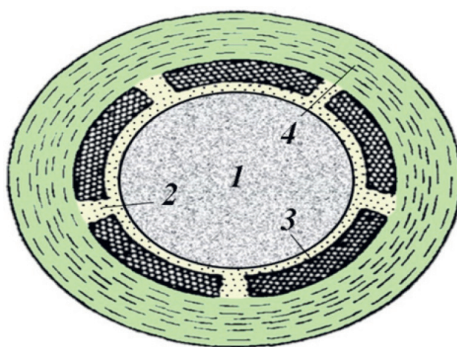


Рис. 6. Схема строения глобулярного агрегата:
1 — минерал (кварц, полевой шпат); 2 — гель из аморфного силиката;
3 — кальцитовая оболочка; 4 — глинистые частицы

Снаружи эта структура покрывается слоем сложного состава, состоящего преимущественно из глинистых частиц. Контакты между отдельными структурными элементами лёссовых грунтов имеют ионно-электростатическую природу, благодаря чему глобулярные агрегаты объединяются в более крупные структурные единицы размером более 0,1 мм и весь грунт приобретает комковатую структуру. Такие структурные элементы неустойчивы и легко разрушаются на отдельные глобулы при повышении влагосодержания грунта.

Еще одной особенностью лёссовых пород является наличие в них карбонатов, а также водорастворимых соединений (гипс, хлористый натрий и другие легкорастворимые соли) в различных гранулометрических фракциях. Такие вещества при малой влажности породы создают достаточно прочные кристаллизационные связи между отдельными частицами в породе, обуславливая агрегацию глинистых и коллоидных фракций. Однако при насыщении породы водой и растворении этих веществ связи между частицами разрушаются, что выражается в довольно быстром размокании и размываемости грунта. Сопротивление сдвигу лёссовых пород также определяется их физическим состоянием: в сухом состоянии его величина значительна, при увлажнении оно сильно снижается; при замачивании существенно уменьшается угол внутреннего трения, величина сцепления падает практически до нуля [15], модуль деформации снижается в 3–4 раза [11].

При полном водонасыщении, как отмечается в ГОСТе 25100–82, лёссовые грунты переходят в плавунное состояние, и далее начинается разжижение грунта. Как известно [15], [16], под разжижением понимается переход грунта в текучее состояние, вне зависимости от причины такого изменения и величины последующих деформаций. При этом происходит разрушение связей между частицами в водонасыщенных дисперсных грунтах, грунт теряет свою несущую способность и переходит в состояние «тяжелой» жидкости. Необходимым условием для возникновения явлений разжижения грунта является полное или близкое к полному насыщение грунта водой.

Из таблицы (с. 811) видно, что содержание частиц с размерами менее 0,1 мм в грунтах основания камеры (скважины № 1, 3, 5) составляет 70–83 %. Таким образом, основную массу грунтов основания составляют лёссовидные пески и супеси. Относительно содержания воды в грунтах основания камеры шлюза № 5 необходимо отметить следующее. На момент строительства гидроузла предпроектными исследованиями было установлено, что основная часть днища камеры врежется в толщу водонасыщенных супесей нижебакинского горизонта. Грунтовые воды на участке шлюза № 5 были привязаны к пескам современного аллювия балки Солянки и песчано-глинистым отложениям нижнего горизонта бакинского яруса, андреевской свиты и онкофорового горизонта. Водоупором для них являлась мощная пачка глин в основании онкофорового горизонта и глины майкопской свиты.

Строительство гидроузла привело к формированию перепада между уровнями верхнего и нижнего бьефов — напор на гидроузле составил 9,4 м. Конструкцией, затрудняющей поступление воды из водохранилища верхнего бьефа на территорию гидроузла, является дамба с противофильтрационным глинистым ядром. В основании верхней головы шлюза отсутствуют противофильтрационные элементы — шпунт и др. С учетом характеристик грунтов под действием напора на шлюз вода из верхнего бьефа проникает в грунт основания шлюза, в котором формируется фильтрационный поток со значительным градиентом фильтрационного напора. Кроме того, георадарными исследованиями, проведенными в 2008 и 2019 гг. на правом крыле дамбы, отделяющей территорию гидроузла от водохранилища верхнего бьефа, зафиксирована зона ослабленного противофильтрационного глиняного ядра. Возможно, это результат недостаточного уплотнения материала ядра при строительстве дамбы или его повреждения при проведении дальнейших ремонтно-строительных работ, что привело к развитию значительного потока фильтрации через правое крыло дамбы. В результате на участке правой пришлюзовой площадки гидроузла произошло выклинивание фильтрационных вод на дневную поверхность, площадка заболочена и заросла камышом. Фильтрационный поток под камерой шлюза имеет диагональную направленность, основная его часть проходит под секциями III, IV и V справа налево (рис. 7). В результате грунт основания камеры оказался полностью насыщен водой, находящейся под напором, о чем, в частности, свидетельствует самоизлив водно-грунтовой пульпы при бурении исследовательских скважин.

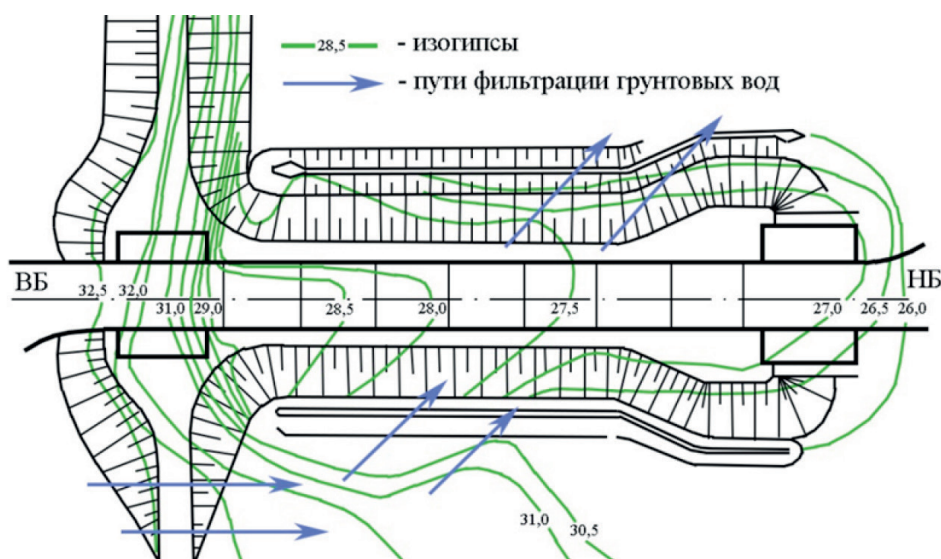


Рис. 7. Схема фильтрации в основании шлюза № 5

На основе данных о перемещениях конструкций шлюза можно сделать вывод о том, что суффозионные процессы в грунтах основания интенсифицировались начиная с 2005 г. Из-за некоторой разницы в характеристиках грунтов и в значительной степени из-за интенсивного бокового фильтрационного потока в основании секций III, IV, V осадки именно этих секций существенно

возросли. Это привело к нарушению герметичности осевой противофильтрационной шпонки в районе этих секций и возникновению гидравлической связи между водой в камере шлюза и потоками фильтрационных вод в грунтах основания. Наличие такой связи подтверждается изменением показаний пьезометров в процессе наполнения — опорожнения камеры и выходом воды в виде грифона на откос обратной засыпки в районе V секции. Все попытки эксплуатационных служб восстановить герметичность осевой шпонки и уменьшить интенсивность осадок центральных секций не имели успеха, непроектные осадки секций продолжились, что вызвало необходимость разработки проекта укрепления грунтов основания камеры с помощью создания грунтоцементных элементов методом струйной цементации.

Однако и в настоящее время после выполнения комплекса работ по укреплению грунтов основания камеры шлюза, как показали исследования 2018–2020 гг. [7], необходимых результатов по стабилизации положения камеры достичь не удалось и техническое состояние шлюза остается предаварийным, а уровень безопасности — неудовлетворительным. В итоге возникает закономерный вопрос: *как же все-таки остановить сверхнормативные осадки конструкций камеры шлюза*. В настоящее время мировая (в том числе и российская) строительная практика предлагает при строительстве и реконструкции сооружений на просадочных грунтах использовать следующие основные технологии [11], [13], [17]:

- предварительное уплотнение грунтов основания сооружения;
- прорезка просадочной толщи сваями;
- физико-химические методы закрепления лёссовых пород;
- водозащитные мероприятия.

Уплотнение грунтов предусматривает специальную подготовку основания перед строительством, что в случае шлюза № 5 Волго-Донского судоходного канала в настоящее время утратило актуальность. Интерес представляет методика прорезки просадочного слоя грунтов основания сваями [18]. Реализованная в 2016–2017 гг. для укрепления грунтов основания камеры шлюза № 5 струйная цементация [5] являлась попыткой опереть камеру шлюза на сваи из грунтоцементных элементов. Неудача этого проекта была обусловлена следующими обстоятельствами. Во-первых, была использована двухкомпонентная технология Jet-2, предполагающая подачу в грунт одновременно со струей цементного раствора, как это происходит по однокомпонентной технологии Jet-1, струи сжатого воздуха¹. Данная технология предполагает создание грунтоцементных элементов большего диаметра. Однако плотность и прочность грунтоцемента при использовании технологии Jet-2 существенно ниже, чем при реализации технологии Jet-1. Во-вторых, и это является главным, не было учтено не только полное водонасыщение грунтов, но и значительные градиенты фильтрационного потока, который вымыл цементную смесь из массива грунтов, не позволив ей затвердеть и сформировать грунтоцементные элементы.

Более интересным для реализации представляется устройство в основании камеры буронабивных или щебеночных свай, заглубленных в глинистое основание, и опирание на них камеры шлюза. Буронабивные сваи² представляют собой вид свайных оснований, когда бетон заливается в устроенную в грунте скважину, в которой размещен армирующий каркас [19]. В слабых и водонасыщенных грунтах для фиксации сваи используются специальные опалубки или обсадные трубы, удерживающие бетон в скважине. После затвердения бетонной смеси обсадные трубы извлекаются или оставляются в скважине в качестве несъемной опалубки. Для повышения устойчивости используются буронабивные сваи с уширениями. В ситуации с гидроузлом шлюза № 5 следует учитывать, что скважины необходимо выполнять в днище камеры существующего шлюза. Для передачи нагрузки от веса камеры на сваи, по-видимому, необходимо наличие узла сопряжения основания камеры со сваями в виде верхнего уширения на свае (рис. 8).

¹ СП 45.133302017. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализиров. ред. СНиП 3.02.01–87. Введ. 17 августа. 2017 г.

² СП 50-102–2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов. Изд. офиц. М., 2004.

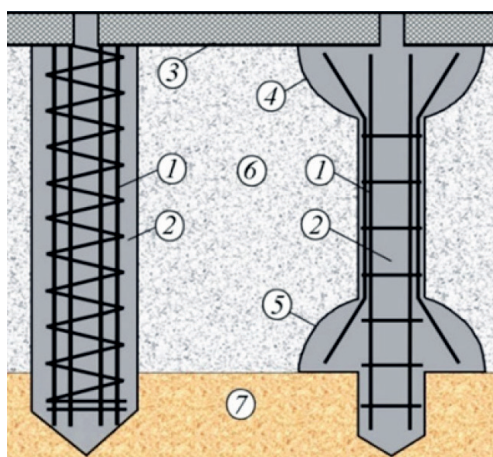


Рис. 8. Бутонабивные сваи обычные (а) и с уширением (б):
1 — арматурный каркас; 2 — бетон; 3 — днище камеры шлюза;
4 — верхнее уширение; 5 — нижнее уширение;
6 — лёссовый грунт; 7 — глинистый водоупор

Щебеночная свая представляет собой скважину, заполненную уплотненным щебнем. Технология изготовления такой сваи заключается в формировании скважины при помощи вибропогружателя с герметичным наконечником. Щебень подается в скважину по подводящей трубе и уплотняется вибратором. Поэтапно поднимаясь, вибропогружатель формирует тело сваи — рис. 9.

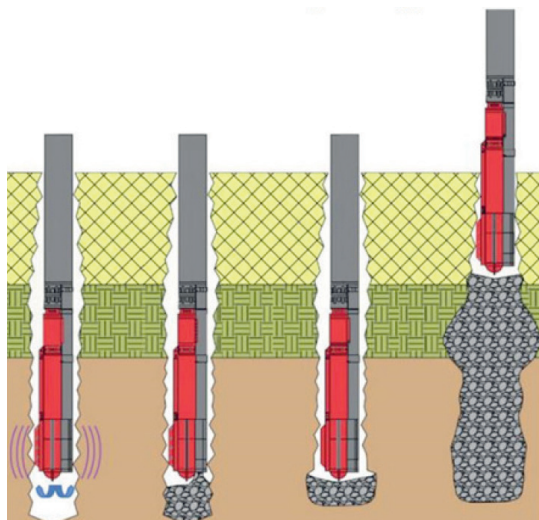


Рис. 9. Этапы формирования щебеночной сваи

Функцией щебеночных свай, при отсутствии обсадных труб, является увеличение прочностных характеристик грунтового массива. В мировой практике известны примеры наполнения скважин другими инертными материалами: цементно-песчаной или песчано-гравийной смесью, однако с учетом существующих в грунтах основания шлюза № 5 фильтрационных потоков с высокими градиентами напора такой наполнитель, скорее всего, будет достаточно быстро размыв.

Из физико-химических методов закрепления лёссовых пород наиболее известны два: силикатизация и термическое упрочнение. Силикатизация — это химическое инъекционное закрепление лёссов. В настоящее время различными производителями рекламируется значительное количество синтетических материалов, повышающих гидроизолирующие и прочностные свойства конструкций. Однако опыт химического закрепления больших массивов водонасыщенного грунта практически отсутствует. Инъектирование целесообразно производить двухкомпонентной смесью с очень малым

периодом затвердения (в пределах 1–2 мин). В противном случае подаваемые в грунт компоненты будут размыты фильтрационным потоком. Сроки сохранения прочностных свойств укрепленного инъекциями грунта должны быть сопоставимы с проектными сроками гарантированной эксплуатации судоходного шлюза — 50–100 лет, что также в настоящее время ни один производитель подтвердить не может.

Методы термического упрочнения грунтов основаны на изменении механических свойств грунтов в результате воздействия на них высоких температур в течение некоторого времени [20], [21]. Это может быть подача в грунт воздуха, нагретого до высоких (от 300 °С до 1400 °С) температур, либо подача в скважины горючей смеси (газообразной, жидкой, твердой пылевидной) и сжигание ее в грунте. Недостатком этих способов является необходимость достаточно длительного (в течение 5–10 дней) термического воздействия и, кроме того, они эффективны при влажности грунтов не более 50 %.

Одним из эффективных и результативных методов укрепления свойств грунтов основания камеры шлюза может служить использование водозащитных мероприятий. Для этого необходимо отделить весь массив грунтов, залегающих в основании шлюза, от окружающих пород, прекратить поступление в основание камеры фильтрационных потоков. Это можно реализовать устройством в грунте по периметру шлюза шпунтовой противофильтрационной завесы на всю глубину водонасыщенного грунта до слоя глинистого водоупора (на гидроузле шлюза № 5 это 10–12 м). Шпунт может быть металлическим (коробчатый, трубошпунт) либо из полимерных материалов. По-видимому, устройство противофильтрационной завесы на основе технологии «стена в грунте» с использованием цементной смеси окажется невозможным ввиду тех же причин, из-за которых не сформировались грунтоцементные элементы. После прекращения поступления грунтовых вод в основание камеры шлюза возможно проведение цикла работ по восстановлению положения камеры шлюза (подъем секций) и укреплению свойств грунта, обеспечивающему его несущую способность, одним из выбранных методов: сваи, цементация, силикатизация и др.

Заключение (Conclusion)

Комплекс работ по укреплению свойств грунтов основания камеры шлюза № 5 Волго-Донского судоходного канала, выполненных в 2016–2017 гг., не достиг планируемых результатов. Причиной этого является недостаточный учет свойств грунтового массива и фильтрационных процессов, проходящих в грунте. Грунт основания камеры изначально был насыщен грунтовыми водами, поскольку при строительстве шлюза расположили в тальвеге балки Солянка. В акте приемки построенного шлюза приемной комиссией было отмечено неудачное расположение шлюза — на траверзе балки, более целесообразно было бы расположить его ближе к склону балки. Создание перепада уровней между верхним и нижним бьефами гидроузлов привело к формированию в грунтах основания камеры напорного фильтрационного потока с существенными градиентами. Помимо этого грунты оказались изначально слабыми, преимущественно лёссового типа. Их водонасыщение привело к просадкам, существенной потере несущей способности и разжижению. Использование технологии двухкомпонентной струйной цементации Jet-2 в таких условиях не могло достичь желаемого результата, а именно формирования в основании камеры грунтоцементных стен, которые смогли бы передать нагрузку от веса камеры на устойчивые слои глинистого водоупора.

Для восстановления положения камеры, прекращения осадок или уменьшения их интенсивности целесообразно проработать с привязкой к объекту конкретные варианты водозащиты массива грунта, расположенного в основании камеры, и последующего повышения его несущей способности. Для этого предложено рассмотреть как минимум два подхода: формирование свай и силикатизация массива грунта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический отчет о строительстве Волго-Донского судоходного канала имени В. И. Ленина, Цимлянского гидроузла и оросительных сооружений 1949–1952 : в 5 т. — М: Госэнергоиздат, 1957. — Т. I : Общее описание сооружений. — 319 с.

2. *Коблев И. И.* Волго-Донской судоходный канал / И. И. Коблев, В. А. Кривошей, О. Ю. Шахмарданов, В. Я. Шестаков. — 2-е изд., испр. — Волгоград: Издатель, 2012. — 376 с.
3. Инструкция по наблюдениям и исследованиям на судоходных гидротехнических сооружениях / Главное управление водных путей и гидротехнических сооружений Министерства речного флота РСФСР. — М.: Транспорт, 1981. — Ч. I: Гидротехническая. — 95 с.
4. Проведение исследовательских работ, поверочно-теоретических расчетов прочности и устойчивости конструкций шлюзов № 5, 10, 11, 12, 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.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2008. — 131 с.
5. Разработка и реализация комплексного проекта реконструкции Волго-Донского судоходного канала. I этап. Третий пусковой комплекс. Реконструкция гидроузла № 5, первая очередь. Разд. 4: Конструктивные и объемно-планировочные решения. Ч. 1: Гидротехнические сооружения. Кн. 2: Укрепление грунтов основания шлюза и дамбы № 74. — Волгоград: ООО «ССМ», 2013. — 324 с.
6. Методические рекомендации по контролю технического состояния и оценке безопасности судоходных гидротехнических сооружений / Министерство транспорта РФ, Федеральное Агентство морского и речного транспорта (Росморречфлот). — М., 2011. — 136 с.
7. Проведение наблюдений и специальных исследований за шлюзом № 5 после выполненных работ по укреплению грунтов основания для разработки рекомендаций по проведению работ по укреплению грунтов основания шлюза № 6 Волго-Донского судоходного канала: заключительный отчет по НИР. — СПб.: ФГБОУ ВО ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2020. — 211 с.
8. *Мустакимов В. Р.* Искусственные основания зданий и сооружений на просадочных грунтах: учеб. пособие для вузов / В. Р. Мустакимов. — М.: Изд-во Юрайт, 2023. — 220 с.
9. *Свидерских А. В.* Анализ изменения характеристик лессовых грунтов в зависимости от пористости / А. В. Свидерских, И. В. Носков // Вестник Евразийской науки. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 74.
10. *Ряченко Т. Г.* Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь) / Т. Г. Ряченко. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2010. — 287 с.
11. *Швецов А. Я.* Лёссы Алтая / А. Я. Швецов. — Барнаул: Изд-во «Новый формат», 2021. — 152 с.
12. *Выскребенцев В. С.* Прочностные свойства лёссовых просадочных грунтов при статических и динамических нагрузках / В. С. Выскребенцев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 3. — С. 38–42. DOI: 10.12737/issn.2071-7318.
13. *Трофимов В. Т.* Грунтоведение / В. Т. Трофимов, В. А. Королев, Е. А. Вознесенский [и др.]. — 6-е изд., переработ. и доп. — М.: Изд-во МГУ, 2005. — 1024 с.
14. *Моргунов К. П.* Гидравлика гидротехнических сооружений / К. П. Моргунов. — СПб.: Лань, 2022. — 312 с.
15. *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.
16. *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.
17. *Игошева Л. А.* Обзор основных методов укрепления грунтов основания / Л. А. Игошева, А. С. Гришина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. — 2016. — Т. 7. — № 2. — С. 5–21. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.01.
18. *Пьянков С. А.* Свайные фундаменты: учебное пособие / С. А. Пьянков. — Ульяновск: УлГТУ, 2007. — 105 с.
19. *Железняков В. А.* Увеличение несущей способности буронабивной сваи методом силикатизации / В. А. Железняков, А. П. Александров, А. С. Куликов // Инженерный вестник Дона. — 2020. — № 11 (71). — С. 321–328.
20. *Кондрашин К. Г.* Возможность термического укрепления грунтов / К. Г. Кондрашин, В. Н. Пилипенко, Е. М. Голубничева // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: науч.-техн. журнал. — 2021. — № 2 (36). — С. 20–25.
21. *Юрданов А. П.* Термическое упрочнение грунтов в строительстве / А. П. Юрданов. — М.: Стройиздат, 1990. — 128 с.

REFERENCES

1. *Tekhnicheskii otchet o stroitel'stve Volgo-Donskogo sudokhodnogo kanala imeni V. I. Lenina, Tsimlyanskogo gidrouzla i orositel'nykh sooruzhenii 1949–1952 v pyati tomakh*. Vol. 1. M.: Gosenergoizdat, 1957.
2. Koble, I. I., V. A. Krivoshei, O. Yu. Shakhmardanov, and V. Ya. Shestakov. *Volgo-Donskoi sudokhodnyi kanal*. 2nd edition. Volgograd: Izdatel', 2012.
3. *Instruktsiya po nablyudeniya i issledovaniyam na sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh*. Vol. 1. M.: Transport, 1981.
4. *Provedenie issledovatel'skikh rabot, poverchno-teoreticheskikh raschetov prochnosti i ustoichivosti konstruktivnykh shlyuzov № 5, 10, 11, 12, 13, 15, gruntovoi damby № 74, napornogo truboprovoda № 34 nasosnoi stantsii № 32 Volgo-Donskogo sudokhodnogo kanala s tsel'yu ustanovleniya fakticheskogo tekhnicheskogo sostoyaniya, zapasov prochnosti i nesushchei sposobnosti sooruzhenii i oborudovaniya, razrabotka kriteriev bezopasnosti*. Scientific report. SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2008.
5. *Razrabotka i realizatsiya kompleksnogo proekta rekonstruktsii Volgo-Donskogo sudokhodnogo kanala. I etap. Tretii puskovoi kompleks. Rekonstruktsiya gidrouzla № 5, pervaya ochered'*. Volgograd: OOO «SSM», 2013.
6. *Metodicheskie rekomendatsii po kontrolyu tekhnicheskogo sostoyaniya i otsenke bezopasnosti sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii*. M., 2011.
7. *Provedenie nablyudeniya i spetsial'nykh issledovaniy za shlyuzom № 5 posle vypolnennykh rabot po ukrepleniyu gruntov osnovaniya dlya razrabotki rekomendatsii po provedeniyu rabot po ukrepleniyu gruntov osnovaniya shlyuza № 6 Volgo-Donskogo sudokhodnogo kanala*. SPb.: FGBOU VO GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2020.
8. Mustakimov, V. R. *Iskusstvennye osnovaniya zdaniy i sooruzhenii na prosadochnykh gruntakh: uchebnoe posobie dlya vuzov*. M.: Izdatel'stvo Yurait, 2023.
9. Sviderskikh, A. V., and I. V. Noskov. "Analysis of characteristics changes in the loess soils depending on porosity." *The Eurasian Scientific Journal* 11.2 (2019): 74.
10. Ryashchenko, T. G. *Regional'noe gruntovedenie (Vostochnaya Sibir')*. Irkutsk: IZK SO RAN, 2010.
11. Shvetsov, A. Ya. *Lessy Altaya*. Barnaul: Izd-vo «Novyi format», 2021.
12. Vyskrebentsev, V. S. "Structural behavior of loess subsiding soils under permanent and dynamic load." *Bulletin of Belgorod state technological university named after. V. G. Shukhov* 3 (2016): 38–42. DOI: 10.12737/issn.2071-7318.
13. Trofimov, V. T., V. A. Korolev, E. A. Voznesenskii, G. A. Golodkovskaya, Yu. K. Vasil'chuk, and R. S. Zian-girov. *Gruntovedenie*. 6th ed. M.: Izd-vo MGU, 2005.
14. Morgunov, K. P. *Gidravlika gidrotekhnicheskikh sooruzhenii*. SPb.: Lan', 2022.
15. 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.
16. 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.
17. Igosheva, L. A., and A. S. Grishina. "Review of the basic methods of the ground improvement." *Construction and Geotechnics* 7.2 (2016): 5–21. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.01.
18. P'yankov, S. A. *Svaynye fundamenty*. Ul'yankovsk: UIGTU, 2007.
19. Zheleznyakov, V. A., A. P. Aleksandrov, and A. S. Kulikov. "Increasing the bearing capacity of a bored pile by silicatization." *Inzhenernyy vestnik Dona* 11(71) (2020): 321–328.
20. Kondrashin, K. G., V. N. Pilipenko, and E. M. Golubnicheva. "Vozmozhnost' termicheskogo ukrepleniya gruntov." *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Priaspia: nauchno-tekhnicheskii zhurnal* 2(36) (2021): 20–25.
21. Yurdanov, A. P. *Termicheskoe uprochnenie gruntov v stroitel'stve*. M.: Stroizdat, 1990.

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 06 сентября 2023 г.
Received: September 6, 2023.