

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-849-861

## THE EMERGENCE AND DEVELOPMENT OF A CRACK IN THE CONCRETE OF THE ABUTMENT OF THE LOWER HEAD OF LOCK № 2 OF THE VOLGA-BALTIC WATERWAY

**K. P. Morgunov**

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

*An analysis of the concrete structures state of the lower head of lock № 2 of the Belousovsky hydroelectric complex of the Volga-Baltic waterway is presented. In 1985, a crack was discovered in the concrete of the left abutment of the lock lower head. Observations for the dynamics of its development have showed that the crack size increases with time. To explain the causes of the crack occurrence and development, an analysis of concrete quality of the lower head structures is made according to the data of previous studies. Taking into account the technology of concreting during the construction process, as well as studies carried out during operation, the low quality of concrete and its heterogeneous structure have been stated. The analysis of the soils structure at the base of the lower head is carried out; the filtration regime of groundwater movement is considered. It is noted that the base soils are represented by fine-grained sands with an interlayer of loams. The presence of several aquifers in the basement soils, as well as the formation of the pressure front of the hydroelectric complex, led to significant gradients of the filtration flow. This contributed to the development of suffusion processes in the soils of the lower head base, which led to the formation of a decompacted layer in the roof of the rocks of the lower head base. The data of modern surveys of soil characteristics confirm that suffusion processes continue at the present time. This led to the occurrence of multidirectional settlement of the right and left abutments of the lower head, which, in turn, led to the development of the crack in the concrete mass. The measures taken to eliminate or stabilize the development of the crack, namely, pumping a cement-sand mixture into the soil, grouting the abutment concrete, anchoring the structure, injecting the concrete mass with a two-component synthetic resin, have not stopped the crack opening, because the main reasons such as the poor quality of concrete and the weak bearing capacity of the underlying soils of the base had not been eliminated.*

*Keywords: shipping lock, concrete strength, filtration flows, suffusion in the ground, grading.*

**For citation:**

Morgunov, Konstantin P. "The emergence and development of a crack in the concrete of the abutment of the lower head of lock № 2 of the Volga-Baltic waterway." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 849–861. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-849-861.

**УДК 624.157: 626.43**

## ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ТРЕЩИНЫ В БЕТОНЕ УСТОЯ НИЖНЕЙ ГОЛОВЫ ШЛЮЗА № 2 ВОЛГО-БАЛТИЙСКОГО ВОДНОГО ПУТИ

**К. П. Моргунов**

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

*Представлен анализ состояния бетонных конструкций нижней головы шлюза № 2 Белоусовского гидроузла Волго-Балтийского водного пути. В 1985 г. в бетоне левого устоя нижней головы шлюза была обнаружена трещина, наблюдения за динамикой развития которой показали, что ее размеры увеличиваются во времени. Для объяснения причин возникновения и развития трещины, по данным проведенных ранее исследований, выполнен анализ качества бетона конструкций нижней головы. С учетом технологии бетонирования в процессе строительства, а также исследований, выполненных в процессе эксплуатации, установлено низкое качество бетона и его разнородная структура. Выполнен анализ структуры грунтов, залегающих в основании нижней головы, рассмотрен фильтрационный режим движения грунтовых вод.*

*Отмечается, что грунты основания представлены мелкозернистыми песками с прослойкой суглинков. Наличие в грунтах основания нескольких водоносных горизонтов, а также формирование напорного фронта гидроузла обусловили значительные градиенты фильтрационного потока. Это способствовало развитию суффозионных процессов в грунтах основания нижней головы, что привело к формированию разуплотненной прослойки в кровле пород основания нижней головы. Данные современных обследований характеристик грунта подтверждают, что суффозионные процессы продолжаются и в настоящее время. Это привело к возникновению разнонаправленной осадки правого и левого устоев нижней головы, что, в свою очередь, явилось причиной возникновения и развития трещины в бетонном массиве. Выполняемые мероприятия по устранению или стабилизации развития трещины, а именно: закачивание в грунт цементно-песчаной смеси, цементация бетона устоя, анкеровка конструкции, а также инъектирование бетонного массива двухкомпонентной синтетической смолой, не привели к остановке раскрытия трещины, поскольку не были устранены основные причины: низкое качество бетона и слабая несущая способность подстилающих грунтов основания.*

*Ключевые слова: судоходный шлюз, прочность бетона, фильтрационные потоки, суффозия в грунте, гранулометрический состав, развитие трещины, цементно-песчаная смесь.*

**Для цитирования:**

*Моргунов К. П. Возникновение и развитие трещины в бетоне устоя нижней головы шлюза № 2 Волго-Балтийского водного пути / К. П. Моргунов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 849–861. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-849-861.*

### **Введение (Introduction)**

В XX в. на европейской территории Российской Федерации была реализована грандиозная программа гидротехнического строительства — создание сети внутренних водных путей — Единой глубоководной системы, соединившей пять морей [1], [2]. Строительство выполнялось в кратчайшие по мировым меркам сроки. Основными судопропускными сооружениями, возведенными на этой системе водных путей, являлись судоходные шлюзы. Строительные конструкции шлюзов выполнялись, как правило, из железобетона, нормативные сроки эксплуатации которого были установлены от 50 до 100 лет. Однако сжатые сроки проектирования и строительства сооружений приводили порой к возникновению проблем, которые проявились через годы после начала эксплуатации сооружений. Прежде всего это касается качества бетона, использованного для строительства конструкций шлюзов.

Укладка бетона выполнялась круглый год, в том числе при отрицательной температуре воздуха [3]. Сжатые сроки строительства не всегда позволяли выдерживать проектный возраст бетона, т. е. возраст, в течение которого он должен приобрести все нормируемые для этого материала показатели качества с учетом способа возведения конструкций и условий твердения бетона<sup>1</sup> [4]–[6]. Порой необходимое для строительства количество бетона не могло быть обеспечено производительностью одного завода, использовался бетон нескольких производств, что предопределяло разницу в его качестве.

Условия работы шлюза: периодическое наполнение и опорожнение камер, обуславливали не только статическое, но и динамическое нагружение бетонных конструкций в процессе эксплуатации. С другой стороны, на состояние строительных конструкций шлюзов оказывали влияние процессы, происходящие в грунтах оснований. Зачастую при строительстве судоходных каналов их трассировали по руслам существующих (например, Волго-Балтийский канал) [7] или старых высохших рек (Волго-Донской судоходный канал) [8]. Аллювиальные грунты речных русел представляют собой обычно перемежение слоев песка и суглинка [9], они, как правило, водонасыщены, в них имеются водоносные горизонты. Помимо этого, при строительстве напорного фронта гидроузла формируется перепад уровней бьефов, создающий дополнительные градиенты фильтрационных потоков в грунтах основания. Фильтрационные процессы в таких слабых несвязных грунтах также оказывают влияние на осадки и перемещение конструкций шлюзов в процессе их эксплуатации.

Настоящая статья посвящена анализу состояния бетонных конструкций нижней головы шлюза № 2 Волго-Балтийского канала.

<sup>1</sup> СП 63.13330.2018. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М., 2018.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Судоходный шлюз № 2 входит в состав сооружений Белоусовского гидроузла Волго-Балтийского водного пути [10]. Шлюз однокамерный, одниточный, расположен в нижнем бьефе. Введен в постоянную эксплуатацию 21.11.1963 г. Нижняя голова шлюза докового типа длиной 34,00 м и шириной 41,20 м. Ее размеры и очертания обусловлены размещением водопроводных галерей опорожнения камеры шлюза и их затворов (на выходе и входе водопроводные галереи разветвляются на два отверстия), а также основных и ремонтных двустворчатых ворот. Помимо шахт, галерей, ниш и пазов в массивах нижней головы для экономии бетона оставлены пустоты, заполненные песком.

В 1985 г. в бетоне левого устоя нижней головы шлюза была обнаружена трещина [11], [12]. Обследование трещины в 1987 г. через шурф, со стороны верховой грани устоя, показало, что она проходит до глубины 3,0 м, наблюдается раскрытие трещины 20 мм в верхней части, на глубине 3,0 м она имеет волосяной характер (рис. 1). В 1989 г. на трещине установлен щелемер, наблюдения за раскрытием трещины в проекции плоскостей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  выполняются каждый месяц.

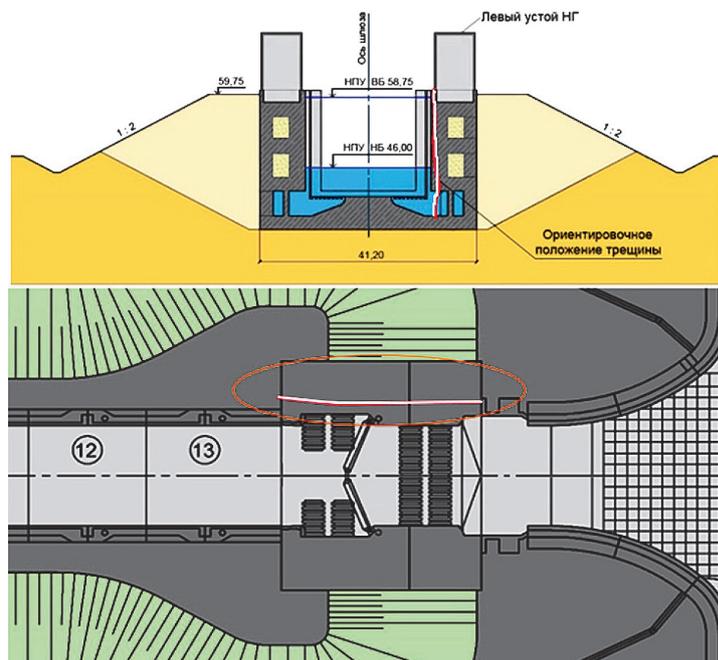


Рис. 1. Ориентировочное положение трещины на разрезе и на плане нижней головы

В 1990 г. были выполнены работы по закреплению трещины металлическими анкерными тягами, проложенными по дну кабельного канала (рис. 2).

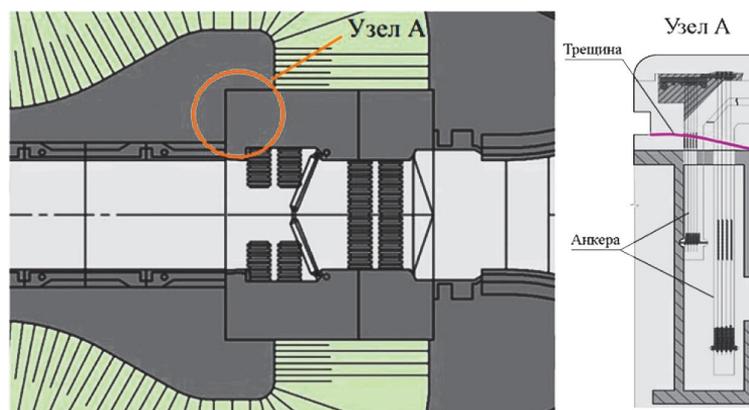


Рис. 2. Закрепление трещины на левом устое нижней головы шлюза № 2

В 1981–2003 гг. проводились работы по цементации грунтов основания левого устоя нижней головы шлюза. Было выполнено девять циклов работ, в основание закачано более 39 т цемента и почти 17 т песка, однако в результате закрепления грунтов основания не произошло, осадки и перемещения устоя продолжались. В этот же период были зафиксированы многочисленные трещины и очаги струйной фильтрации в левой галерее левого устоя нижней головы — на левой стене и потолке (рис. 3).

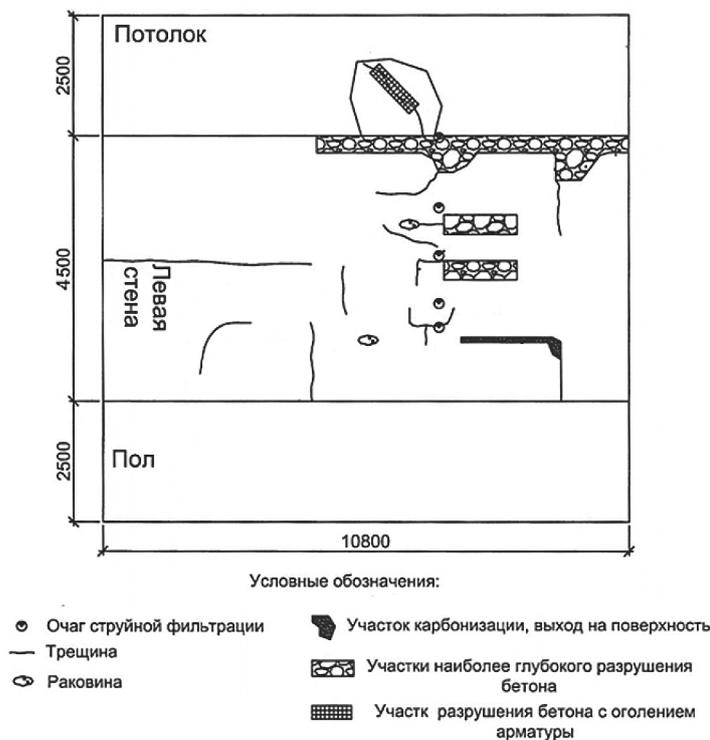


Рис. 3. Схема расположения фильтрационных выходов в левой галерее левого устоя (развертка)

Помимо цементации грунтов основания в период 1975–2002 гг. было проведено 38 циклов работ по цементации бетона устоев нижней головы, включая потолок и стены водопроводных галерей. В 2006 г. при замене штрабного бетона и пят левого веревяльного столба ворот нижней головы была обнаружена трещина с раскрытием 2,0–11,0 см (рис. 4).

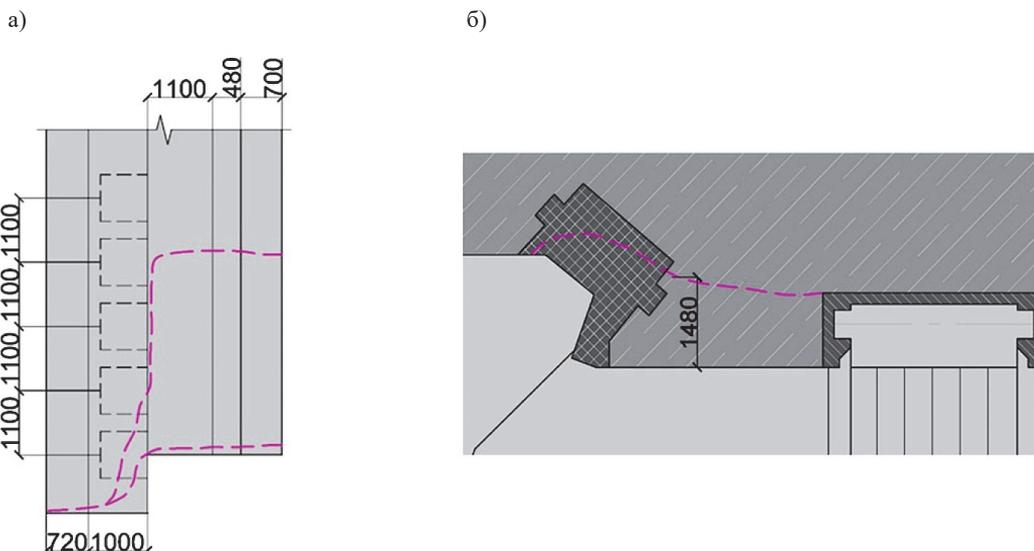


Рис. 4. Трещина в стене левой верей:

а — развертка стен с границами контура трещины; б — вид трещины в плане

В 2010 г. были выполнены работы по анкеровке левого устоя нижней головы шлюза № 2, однако раскрытие трещины продолжилось. В 2019 г. были выполнены работы по устранению фильтрации из нижнего бьефа в левую галерею с использованием двухкомпонентной полиуретановой смолы MasterRok MP355 Thix. Активные очаги фильтрации были устранены, однако намокание бетона стен продолжается. Данные обследований, проведенных в 1981, 1995, 2000 и 2019 гг., свидетельствуют о системном раскрытии трещин в водопроводных галереях на одних и тех же участках и несмотря на ремонтные мероприятия по их инъецированию происходит повторное раскрытие трещин в стенах и потолке галерей, что приводит к возникновению очагов фильтрации сквозь трещины.

### Результаты (Results)

*Бетон нижней головы.* Исследование качества бетона левого устоя нижней головы проводилось за время его эксплуатации неоднократно. Следует отметить, что во время строительства половина периода работ по укладке бетона нижней головы проводилась в холодные «неблагоприятные» месяцы при среднесуточной температуре воздуха  $-2,6 \dots -10,9$  °С.

Исследования свойств бетона, выполненные в 2007 и 2010 гг. методом электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования (ЭМИ СШП) [13] и выбуриванием кернов с последующим их испытанием, показали, что бетонный массив устоев крайне неоднороден. В нем имеются участки неплотного трещиноватого бетона, а также зоны высокопористого (непробитированного) бетона. Выход кернов составил около 65–70 %, однако в некоторых скважинах — 30 %. В ходе выбуривания некоторые части кернов рассыпались на мелкие фрагменты, не связанные растворной составляющей.

Однозначный вывод о прочности в результате проведенных исследований сделать не удалось — в некоторых образцах прочность бетона выбуренных кернов на сжатие соответствовала классу бетона В20, в других фактическая прочность бетона оказалась ниже проектной марки. При этом был зафиксирован существенный разброс значений по прочности отбираемых образцов, коэффициент вариации прочности бетона по нижней голове составил 26,5 %. В соответствии с нормативом<sup>1</sup> предельный коэффициент вариации для массивных гидротехнических конструкций не должен превышать 20 %. Высокий коэффициент вариации свидетельствует о том, что бетон нижней головы имеет весьма разнородную структуру. Отмечена также низкая марка бетона по морозостойкости и водонепроницаемости.

Зондирование методом ЭМИ СШП показало, что вдоль нижнего обреза основания нижней головы преобладают пористые фракции бетона, которые в центральной части нижней головы являются водонасыщенными, что, безусловно, оказывает отрицательное влияние на прочностные свойства бетона [14]–[16]. Также данными зондирования ЭМИ СШП подтверждено, что трещина в бетоне левого устоя имеет сквозной характер и проходит вдоль всего устоя.

*Грунты в основании нижней головы.* При строительстве шлюза оказалось, что в основании нижней головы залегала глинистая пачка 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 свойств в открытом котловане, были полностью замещены песчаными грунтами слоем мощностью 1,0–1,5 м.

Последние по времени инженерно-геологические исследования грунтов в основании нижней головы шлюза № 2 проводились в 2020 г. и включали бурение скважин, отбор проб и лабораторные исследования образцов, а также геофизическое обследование участка: сейсмоакустическое просвечивание и георадарное обследование. В результате было выделено семь инженерно-геологических элементов (ИГЭ):

- ИГЭ-1 — песок пылеватый средней плотности средней степени водонасыщения однородный;
- ИГЭ-1а — песок пылеватый рыхлый средней степени водонасыщения однородный;
- ИГЭ-2 — песок пылеватый средней плотности водонасыщенный однородный;

<sup>1</sup> ГОСТ 18105–2010. Бетоны. Правила контроля прочности. М.: Стандартинформ, 2013.

ИГЭ-2а — суглинок легкий песчаный тугопластичной консистенции непросадочный ненабухающий;

ИГЭ-3 — суглинок тяжелый пылеватый полутвердой консистенции непросадочный ненабухающий;

ИГЭ-4 — песок мелкий средней плотности водонасыщенный однородный с прослоями суглинка до 8 см;

ИГЭ-5 — песок мелкий средней плотности водонасыщенный однородный.

Мелкие фракции составляют не менее 70 % объема (ИГЭ1, ИГЭ2, ИГЭ3, ИГЭ). Определение величины сцепления показало ее незначительность —  $C = 0,002-0,004$ . Отмечено наличие техногенных грунтов, перемещенных из мест их естественного залегания и представляющих собой грунты отсыпки у стен шлюза. Результаты исследования динамического сопротивления грунтов показали низкую несущую способность грунтов, залегающих до глубин 10–12 м.

*Фильтрационный режим в грунтах основания.* Участок шлюза № 2, в соответствии с СП-11-105-97<sup>1</sup> по подтопляемости, характеризуется как постоянно подтопленный в естественных условиях I-A-1. Анализ характеристик грунтов свидетельствует о наличии значительных фильтрационных потоков в основании нижней головы шлюза. В период строительства шлюза при выполнении земляных работ по устройству котлована значительные усилия были приложены для организации специальных работ по водопонижению и водоотливу. Разработка котлована нижней головы производилась в обводненных переслаивающихся разностях мягких грунтов при наличии напорного и безнапорного водоносных горизонтов. Снизить депрессионную поверхность скважинами глубинного водоотлива не удавалось, депрессионная поверхность выклинивалась на поверхность, переувлажненный грунт при небольших динамических воздействиях терял сцепление, превращаясь в пльвунную массу. Уровень грунтовых вод в котловане удалось снизить только с использованием иглофильтровых установок.

В ходе проведения гидрогеологических и геофизических исследований грунтов, расположенных непосредственно под шлюзом № 2 и на сопредельных территориях, отмечено наличие нескольких водоносных горизонтов. Создание напорного фронта с перепадом уровней 12,75 м при нормальном подпорном уровне, заполнение Белоусовского водохранилища и подъем уровня грунтовых вод в районе шлюза — все это способствовало формированию в грунтах основания фильтрационных потоков со значительными градиентами напора. О весьма неоднородной структуре и водонасыщенности грунтов в основании нижней головы шлюза также свидетельствует то, что при выполнении работ по укреплению грунтов путем закачивания цементно-песчаной смеси из шестнадцати скважин, пробуренных через пол левой галереи, в пяти из них штанги при бурении, пройдя бетонную толщину, проваливались в грунт, фиксировалось наличие пустот, а из десяти скважин произошел вынос воды без примесей и с примесями песка различного цвета: светлого, серого, коричневого и красно-коричневого.

В период эксплуатации гидроузла начался фильтрационный вынос мелких частиц глинистых грунтов основания нижней головы, а также суффозионный вынос мелких фракций из песчаных грунтов. Подтверждением этого является изменение гранулометрического состава пылеватых и мелких песков, которыми сложены инженерно-геологические элементы основания ИГЭ1, ИГЭ2 и ИГЭ4 — пески пылеватые и мелкие (соответствующие данные приведены в таблице).

#### Процентное содержание частиц в грунте

Год	0,25–0,1 мм	Менее 0,1 мм	0,25–0,1 мм	Менее 0,1 мм	0,25–0,1 мм	Менее 0,1 мм
	ИГЭ1		ИГЭ2		ИГЭ4	
2005	49,5	45,1	48,4	45,8		
2013	53,3	38,4	57,9	36,15	54,62	39,82
2020	50	26,7	52,1	35,1	59,0	15,6

<sup>1</sup> СП-11-105–97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. Введ. 01.01.2001.

Очевидна тенденция вымывания мелких частиц (менее 0,1 мм) и увеличение доли относительно крупных частиц. При этом следует обратить внимание на то, что с момента создания напорного фронта (строительства гидроузла) прошло более 50 лет. Это свидетельствует о том, что суффозионные процессы в песчаных слоях грунта продолжаются.

*Осадки конструкций шлюза.* Наблюдения за осадками конструкций шлюза № 2, в том числе нижней головы, начались еще в период строительства и продолжаются до сих пор, прежде всего по показаниям осадочных марок. Осадки конструкций нижней головы и номера осадочных марок приведены на рис. 5.

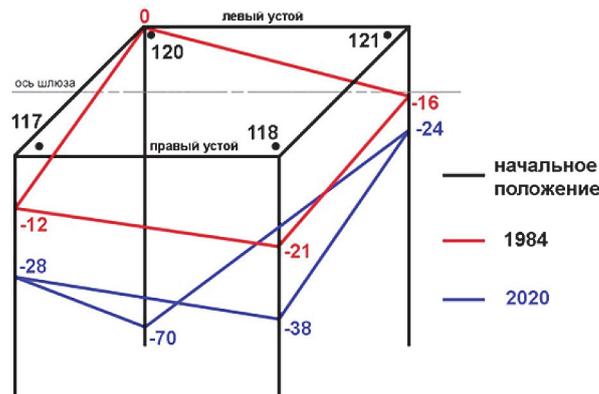


Рис. 5. Осадки конструкций нижней головы шлюза № 2

График осадок по маркам 120 и 121 (левый устой нижней головы) приведен на рис. 6.

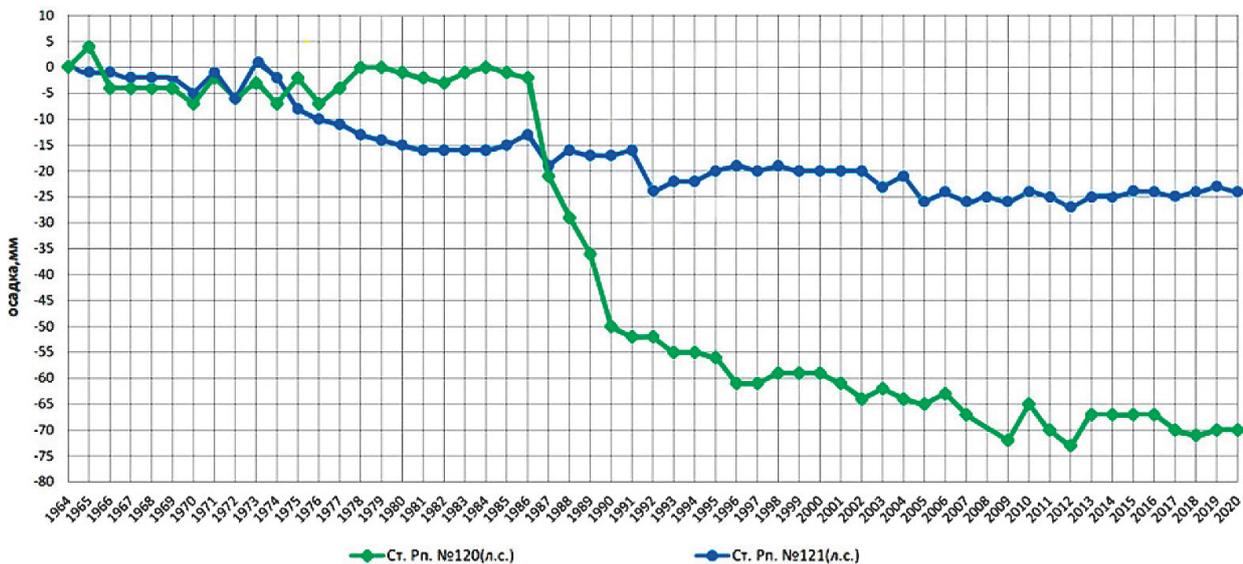


Рис. 6. Осадки левого устоя нижней головы

Анализ показаний приборов свидетельствует о том, что осадки конструкций начались с момента строительства и эксплуатации шлюза. До 1979–1980 гг. их характер был обусловлен естественными процессами консолидации грунтов основания [17], [18], как известно, процессы консолидации могут продолжаться десятилетиями. Затем началось существенное увеличение интенсивности осадков, которая в последующие 10–15 лет в среднем составила до 5,5 мм/год. Причем осадка левого и правого устоев имела разнонаправленный характер: левый устой перемещался на юго-восток, правый — на северо-запад (см. рис. 5). Очевидно, это обусловлено процессами суффозии в грунте — выносом мелких фракций глинистых и песчаных частиц (см. таблицу на с. 854).

### Обсуждение (Discussion)

Проведенные исследования позволяют утверждать, что причиной перемещения и деформаций нижней головы шлюза № 2 являются геологические особенности грунтов основания. Изначально слабые грунты после создания напорного фронта гидроузла подверглись воздействию фильтрационного потока, направленного от верхнего бьефа к нижнему, а также от верхнего бьефа к руслу реки Вытегра [19].

В период эксплуатации гидроузла начался фильтрационный вынос мелких частиц глинистых грунтов основания нижней головы, а также суффозионный вынос мелких фракций из песчаных грунтов, который, судя по сравнительному анализу данных исследований вплоть до 2020 г., продолжается. Помимо фильтрационного потока на характеристики грунтов оказывала динамическое воздействие также и работа шлюза (заполнение – опорожнение камеры шлюза, работа механизмов рабочих ворот). В результате сформировалась разуплотненная прослойка грунта в кровле пород основания нижней головы [20], [21]. Это привело к повышению интенсивности осадок конструкций нижней головы. Именно эта интенсификация, причем разнонаправленная для разных частей нижней головы, вызвала появление трещины в левом устое. Наблюдения за динамикой развития трещины проводились после установки на ней щелемера в 1989 г. (рис. 7).

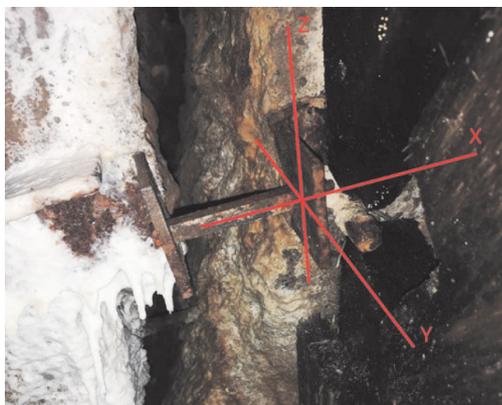


Рис. 7. Положение щелемера для наблюдения за трещиной

На рис. 7 видны значительные следы выщелачивания бетона в окрестности трещины, что свидетельствует о снижении его прочностных характеристик. Изменение размеров трещины показано на рис. 8.

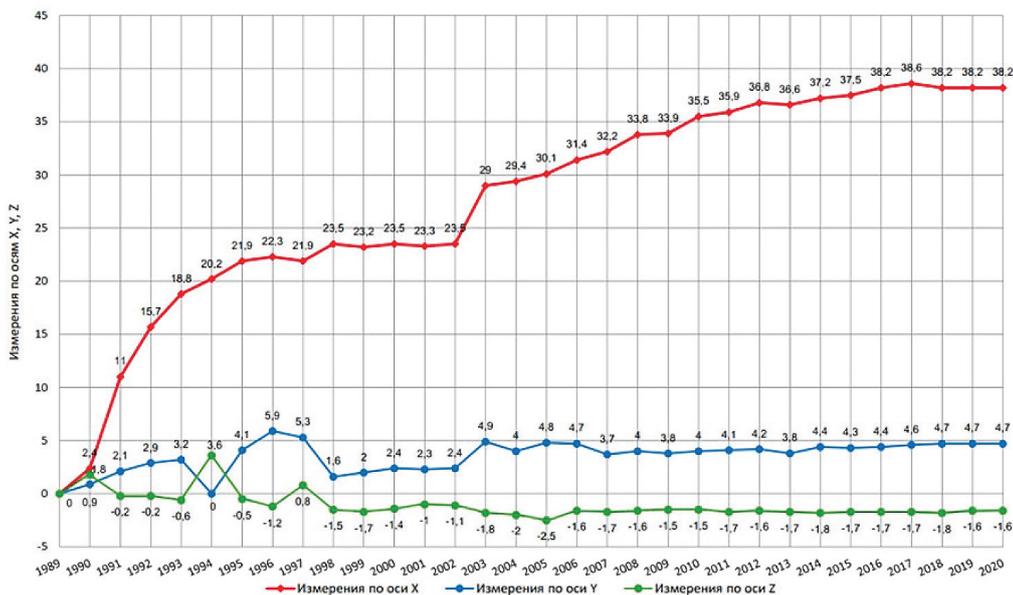


Рис. 8. Изменение размеров трещины в левом устое нижней головы

Из графика на рис. 8 видно, что несмотря на описанные ранее мероприятия и попытки стабилизации раскрытия трещины (анкеровка бетонного массива, цементация грунтов основания и бетона устоя), размеры трещины в поперечном направлении (по оси X) продолжают увеличиваться. Так, к 2020 г. ее раскрытие составило 38,2 мм. Некоторая стабилизация в 2018–2020 гг. пока не дает основания утверждать, что раскрытие трещины прекратилось. Анализ динамики изменения гранулометрического состава верхнего слоя грунтов основания показал, что содержание частиц размером менее 0,25 мм изменилось от 94,6 % в 2005 г. до 69,9 % в 2020 г.

Известно, что пески такого гранулометрического состава при подтоплении (водонасыщении) подвержены разжижению [22], [23], т. е. переходу водонасыщенных дисперсных грунтов в текучее состояние в результате разрушения структурных связей под действием напряжений разного типа. При этом может произойти полная или частичная потеря грунтом несущей способности и переход его в текучее состояние в результате разрушения структуры и смещения частиц друг относительно друга. Такие разжиженные грунты имеют названия «тяжелая жидкость», «флюид». Разжиженная водогрунтовая среда имеет многие свойства жидкости и прежде всего *текучесть*, обладая при этом за счет включения твердых частиц большей плотностью, чем вода.

Явление разжижения грунтов мало исследовано в области гидротехнического строительства, хотя условия для его возникновения зачастую формируются в основаниях гидротехнических сооружений. Одним из условий является наличие в толще грунта слоев гранулированных частиц в более мягких материалах, что нередко встречается во многих речных отложениях [19]. В частности, как показали исследования, именно такая структура грунтов — перемежение слоев песка и суглинков — сформировалась в основании шлюза № 2, расположенного в долине реки Вытегры.

Известно, что прочность грунтов обусловлена следующими показателями:

- углом внутреннего трения, характеризующим силу трения между частицами грунта;
- сцеплением, характеризующим сопротивление частиц грунта всякому перемещению и зависящим от структурных связей глинистых частиц.

Угол внутреннего трения и сцепление вместе обуславливают сопротивление грунтов сдвигу. При подтоплении (водонасыщении) слоев грунта уменьшаются силы трения между частицами и сопротивление сдвигу. Кроме того, на частицы грунта действует Архимедова сила взвешивания, которая уменьшает давление между частицами, а значит, снижает силу трения. Размокание глинистых и пылеватых частиц, связывающих крупные зерна, также снижает силу сцепления между ними. При этом одновременно развиваются процессы коагуляционного структурообразования и гравитационного уплотнения [24]. Эти явления, характерные для «переходных» (от чистых песков к глинам) разностей грунтов, таких как пылеватые пески, супеси и некоторые разности легких суглинков, связаны с разрушением в динамических условиях как коагуляционных, так и механических контактов. Причем специфический состав этих грунтов способствует взаимному усилению разрушения обоих видов контактов. 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 этих грунтов к длительному нахождению в разжиженном состоянии.

### Заключение (Summary)

Выполненный анализ выявил следующие причины возникновения трещин в левом устье нижней головы: геологические особенности грунтов основания, низкие прочностные качества бетона устоя. Ослабление несущих свойств грунтов основания и вызванное фильтрационной суффозией, привело к разнонаправленным осадкам и перемещениям левого и правого устоев нижней головы шлюза, что в сочетании с низким качеством бетона явилось причиной возникновения трещин в бетонных конструкциях.

Попытки цементации грунтов не привели к их укреплению. Это обусловлено тем обстоятельством, что закачиваемая в грунт песчано-цементная смесь подвергалась воздействию фильтрационных потоков значительной мощности, не позволявших сформироваться твердым грунтоцементным

элементам. В результате проведения геофизических исследований грунтов в них не было обнаружено никаких следов закачивания цемента. Мероприятия по укреплению бетонных конструкций: анкеровка, цементация, инъектирование двухкомпонентной полиуретановой смолой, не улучшили его качества.

Поскольку причины возникновения трещин не устранены, они продолжают развиваться. Представляются целесообразными два способа устранения причин разнонаправленного перемещения различных частей конструкции нижней головы: укрепление грунтов основания путем снижения их водонасыщенности [25] и дополнительная стабилизация конструкций нижней головы. Методы снижения интенсивности фильтрационных потоков в основании нижней головы могут включать в себя устройство шпунтовой противофильтрационной завесы по периметру головы, дренирование (отвод воды) устройствами различной конструкции, например, с использованием вакуумных иглофильтров [26].

Стабилизация конструкций нижней головы может быть обеспечена переносом опирания со слабых грунтов, находящихся непосредственно в основании головы, на грунты с более высокой несущей способностью (на глубинах 12–13 м ниже основания нижней головы залегают плотные пески). Для переноса нагрузки от бетонного массива нижней головы на более прочное основание необходимо предусмотреть устройство свайного ростверка [27] с использованием буронабивных [28] или щебеночных [29] свай.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыденко А. А. Единая глубоководная система России и проблемы повышения эффективности ее использования / А. А. Давыденко // Транспорт Российской Федерации. — 2011. — № 2 (33). — С. 52–53.
2. Шурухин Л. А. Единая глубоководная система России должна стать действительно единой / Л. А. Шурухин // Гидротехника. — 2020. — № 3 (60). — С. 28–29.
3. Добшиц Л. М. Особенности испытаний бетона в зимнее время / Л. М. Добшиц, А. В. Белов // Инновации и инвестиции. — 2019. — № 2. — С. 195–198.
4. Коноплёв С. Н. О проектном возрасте бетона / С. Н. Коноплёв // Технологии бетонов. — 2013. — № 5 (82). — С. 38–39.
5. Дмитриев А. Л. Нормируемые показатели прочности бетона: необходимость назначения проектного возраста / А. Л. Дмитриев, В. Д. Староверов // Технологии бетонов. — 2021. — № 4 (177). — С. 57–61.
6. Тошин Д. С. Влияние условий длительного твердения на прочность тяжелого бетона / Д. С. Тошин, Е. А. Ровенская // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. — 2020. — № 2 (45). — С. 71–75. DOI: 10.25628/UNIPR.2020.45.2.012.
7. История Волго-Балта / Под ред. В. К. Николаева. — СПб.: Лики России, 2014. — 232 с.
8. 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.
9. Добровольский Г. В. Аллювиальные почвы речных пойм и дельт и их зональные отличия / Г. В. Добровольский, П. Н. Балабко, Н. В. Стасюк, Е. П. Быкова // Аридные экосистемы. — 2011. — Т. 17. — № 3 (48). — С. 5–13.
10. Технический паспорт шлюза № 2 Белоусовского гидроузла. — СПб.: ФБУ «Администрация «Волго-Балт». — 173 с.
11. Лунев Е. А. Трещина в устье нижней головы шлюза № 2 Белоусовского гидроузла — предложения по ремонту / Е. А. Лунев, К. П. Моргунов, Г. Г. Рябов // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. — 2018. — Т. 288. — С. 27–36.
12. 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: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-533-546.
13. Болтинцев В. Б. О некоторых возможностях метода электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования при инженерно-геологических изысканиях в тоннелях / В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин, А. А. Черемисин, К. П. Безродный // Журнал радиоэлектроники. — 2019. — № 12. — С. 5. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.12.13.

14. Романенко И. И. Факторы, влияющие на капиллярное водонасыщение бетонных образцов / И. И. Романенко, Э. М. Пинт, И. Н. Петровнина, К. А. Еличев, М. И. Романенко // *Фундаментальные исследования*. — 2016. — № 10–2. — С. 343–348.
15. Singla A. Modelling of capillary water absorption in sound and cracked concrete using a dual-lattice approach: Computational aspects / A. Singla, B. Šavija, L. J. Sluys, C. R. Rodríguez // *Construction and Building Materials*. — 2022. — Vol. 320. — Pp. 125826. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125826.
16. Kim J. Effects of water saturation and distribution on small-strain stiffness / J. Kim, J. Won, J. Park // *Journal of Applied Geophysics*. — 2021. — Vol. 186. — Pp. 104278. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104278.
17. Колосов М. А. Консолидация грунтов в основании шлюза — важнейший критерий оценки надежности гидротехнического сооружения / М. А. Колосов, К. П. Моргунов // *Речной транспорт (XXI век)*. — 2019. — № 1 (89). — С. 44–47.
18. Минаев О. П. Важнейший показатель при оценке надежности судоходных шлюзов в правильном анализе результатов и причин длительной консолидации грунтов в основании / О. П. Минаев, М. А. Колосов, К. П. Моргунов // *Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сб. науч. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф. / Под ред. Г. Л. Гладкова, К. П. Моргунова*. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2019. — С. 321–330.
19. 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.
20. Chen C. Soil deformations induced by particle removal under complex stress states / C. Chen, L. M. Zhang, L. Pei, Z. Y. Wu // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. — 2020. — Vol. 146. — Is. 9. — Pp. 04020085. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002342.
21. Maroof M. A. Effects of grain morphology on suffusion susceptibility of cohesionless soils / M. A. Maroof, A. Mahboubi, A. Noorzad // *Granular Matter*. — 2021. — Vol. 23. — Is. 1. — Pp. 1–20. DOI: 10.1007/s10035-020-01075-1.
22. Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений / П. Л. Иванов. — М.: Высшая школа, 1991. — 447 с.
23. Крамаренко В. В. Грунтоведение / В. В. Крамаренко. — М.: Издательство Юрайт, 2020. — 430 с.
24. Kolosov M. A. The phenomena of soil liquefaction in the bases of hydraulic structures / M. A. Kolosov, K. P. Morgunov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 868. — Is. 1. — Pp. 012081. DOI: 10.1088/1755-1315/868/1/012081.
25. Igosheva L. A. Review of the basic methods of the ground improvement / L. A. Igosheva, A. S. Grishina // *Construction and Geotechnics*. — 2016. — Vol. 7. — Is. 2. — Pp. 5–21. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.01.
26. Болотских Н. С. Новые средства вакуумного уплотнения обводненных и слабоустойчивых грунтов с плохими фильтрационными свойствами / Н. С. Болотских // *Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве: сб.* — Киев: Будивельник, 1994. — С. 254–257.
27. Галицкий В. Г. Глубинное уплотнение просадочных грунтов грунтовыми сваями / В. Г. Галицкий [и др.] // *Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве: сб.* — Киев: Будивельник, 1994. — С. 276–279.
28. Шакиров И. Ф. Исследование несущей способности буронабивной сваи в массиве грунта, укрепленного напорной инъекцией цементного раствора / И. Ф. Шакиров, И. И. Шайхутдинов // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. — 2017. — № 3 (41). — С. 139–145.
29. Серегин Н. Г. Исследования повышения несущей способности грунтов оснований методом цементации / Н. Г. Серегин, В. И. Запруднов // *Лесной вестник. Forestry bulletin*. — 2020. — Т. 24. — № 5. — С. 104–108. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-104-108.

## REFERENCES

1. Davydenko, A. A. “Edinaya glubokovodnaya sistema Rossii i problemy povysheniya effektivnosti ee ispol'zovaniya.” *Transport of Russian Federation* 2(33) (2011): 52–53.
2. Shurukhin, L. “Russia’s extended deep inland waterways should actually become a unified, uninterrupted system.” *Hydrotechnika* 3(60) (2020): 28–29.
3. Dobshits, L. M., and A. V. Belov. “Osobennosti ispytaniy betona v zimnee vremya.” *Innovatsii i investitsii* 2 (2019): 195–198.
4. Konoplyov, S. N. “About the project age of concrete.” *Concrete Technologies* 5(82) (2013): 38–39.

5. Dmitriev, A. L., and V. D. Staroverov. "Normalized indicators of concrete strength: the need to assign the design age." *Concrete technologies* 4(177) (2021): 57–61.
6. Toshin, Dmitry, and Ekaterina Rovenskaya. "Influence of long-term hardening conditions on the strength of heavy concrete." *Akademicheskij vestnik Uralniiproekt RAASN* 2(45) (2020): 71–75. DOI: 10.25628/UNIIP.2020.45.2.012.
7. Nikolaev, V. K., ed. *Istoriya Volgo-Balta*. SPb.: Liki Rossii, 2014.
8. Koble, I. I., V. A. Krivoshei, O. Yu. Shakhmardanov, and V. Ya. Shestakov. *Volgo-Donskoi sudokhodnyi kanal*. 2<sup>nd</sup> edition. Volgograd: Izdatel', 2012.
9. Dobrovolski, G. V., P. N. Balabko, N. V. Stasjuk, and E. P. Bykova. "Alluvial soils of river floodplains and deltas and their zonal differences." *Arid Ecosystems* 1.3 (2011): 119–124. DOI: 10.1134/S207909611103005X.
10. *Tekhnicheskii pasport shlyuza № 2 Belousovskogo gidrouzla*. SPb.: FBU «Administratsiya «Volgo-Balt».
11. Lunev, Ye. A., K. P. Morgunov, and G. G. Ryabov. "Crack in abutment of downstream end of lock no. 2 of Belousovsky hydroelectric complex — repair proposals." *Proceedings of the VNIIG* 288 (2018): 27–36.
12. 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: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-533-546.
13. Boltintsev, V. B., V. N. Ilyakhin, A. A. Cheremisin, and K. P. Bezrodny. "On some possibilities of the method of electromagnetic pulsed ultra-wideband sounding in engineering-geological surveys in tunnels." *Journal of Radio Electronics* 12 (2019): 5. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.12.13.
14. Romanenko, I. I., E. M. Pint, I. N. Petrovnina, K. A. Elichev, and M. I. Romanenko. "Factors affecting the capillary water saturation of concrete samples." *Fundamental Research* 10–2 (2016): 343–348.
15. Singla, Anmol, Branko Šavija, Lambertus J. Sluys, and C. Romero Rodriguez. "Modelling of capillary water absorption in sound and cracked concrete using a dual-lattice approach: Computational aspects." *Construction and Building Materials* 320 (2022): 125826. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125826.
16. Kim, Jongchan, Jongmuk Won, and Junghee Park. "Effects of water saturation and distribution on small-strain stiffness." *Journal of Applied Geophysics* 186 (2021): 104278. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104278.
17. Kolosov, M. A., and K. P. Morgunov. "Konsolidatsiya gruntov v osnovanii shlyuza — vazhneishii kriterii otsenki nadezhnosti gidrotekhnicheskogo sooruzheniya." *River transport (XXIst century)* 1(89) (2019): 44–47.
18. Minaev, O. P., M. A. Kolosov, and K. P. Morgunov. "Vazhneishii pokazatel' pri otsenke nadezhnosti sudokhodnykh shlyuzov v pravil'nom analize rezul'tatov i prichin dlitel'noi konsolidatsii gruntov v osnovanii." *Vodnye puti i ruslovy protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putei: Sbornik nauchnykh trudov*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2019. 321–330.
19. 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.
20. Chen, Chen, L. M. Zhang, L. Pei, and Z. Y. Wu. "Soil deformations induced by particle removal under complex stress states." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 146.9 (2020): 04020085. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002342.
21. Maroof, M. Ali, Ahmad Mahboubi, and Ali Noorzad. "Effects of grain morphology on suffusion susceptibility of cohesionless soils." *Granular Matter* 23.1 (2021): 1–20. DOI: 10.1007/s10035-020-01075-1.
22. Ivanov, P. L. *Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenii*. M.: Vysshaya shkola, 1991.
23. Kramarenko, V. V. *Gruntovedenie*. M.: Izdatel'stvo Yurait, 2020.
24. Kolosov, M. A., and K. P. Morgunov. "The phenomena of soil liquefaction in the bases of hydraulic structures." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 868. No. 1. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/868/1/012081.
25. 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.
26. Bolotskikh, N. S. "Novye sredstva vakuumnogo uplotneniya obvodnennykh i slaboustoichivyykh gruntov s plokhimi fil'tratsionnymi svoystvami." *Sb. «Zakreplenie i uplotnenie gruntov v stroitel'stve»*. Kiev: Budivel'nik, 1994. 254–257.
27. Galitskii, V. G., et al. "Glubinnoe uplotnenie prosadochnykh gruntov gruntovymi svayami." *Sb. «Zakreplenie i uplotnenie gruntov v stroitel'stve»*. Kiev: Budivel'nik, 1994. 276–279.

28. Shakirov, I. F., and I. I. Shaikhutdinov. "Researches of the bored pile bearing capacity in a soil massive, reinforced by cement mortar pressure injection." *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering* 3(41) (2017): 139–145.

29. Seregin, Nikolay Grigorievich, and Vyacheslav Il'ich Zaprudnov. "Research of properties of cement-soil piles of foundations of buildings and structures." *Forestry Bulletin* 24.5 (2020): 104–108. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-104-108.

**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](mailto: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](mailto:morgunovkp@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 20 сентября 2022 г.  
Received: September 20, 2022.*