УДК [627,5+624.157]

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ МЕСТНОГО РАЗМЫВА ГРУНТА ДНА У ОПОР СКВОЗНОГО СВАЙНОГО СООРУЖЕНИЯ ПРИЧАЛА

Шунько Н.В. [1], Шунько А.А. [2]

[1, 2]ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: [1]natshunko@rambler.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования величины местного размыва грунта дна у опор сквозного сооружения причала вертикального профиля в волновом лотке. Рассматриваемое сооружение является причальным и входит в состав гидротехнических сооружений Морского терминала Находкинского Завода минеральных Удобрений. У основания причала проектом предусмотрена каменно-набросная постель. На основании анализа результатов проведенного физического моделирования (лабораторных исследований), была определена величина местного размыва (изменения) составляющих конструкции каменно-набросной постели у опор сквозного свайного сооружения модели грузового причала. Дана оценка влияния экспериментально определенного местного размыва на устойчивость сооружения причала.

Ключевые слова: причал сквозного типа, морской терминал, сваи, параметры волнения, физическое моделирование, обеспеченность шторма, размыв донного грунта.

ВВЕДЕНИЕ

У фундаментов гидротехнических сооружений, проектируемых на относительно небольших глубинах, под воздействием ветровых волн и течений, происходит размыв поверхностных слоев донного грунта. Как правило, это явление наблюдается, в основном, у оснований оградительных и берегозащитных сооружений, а так же у фундаментов морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений. Если не предусмотреть защитные мероприятия от придонных размывов, то гидротехническое сооружение может потерять устойчивость. Поэтому, на этапах проектирования самой конструкции сооружения, разрабатывают и его защиту от размывов морского дна у фундамента [1, 2].

Для подбора наиболее эффективного конструктивного варианта защиты, а также разработки процесса производства работ по ее устройству, необходимо определить величину скоростей придонного течения. Величина донных скоростей определяется в зависимости от волновых параметров в системе расчетного шторма, глубины воды у сооружения, а также средней продолжительности и направленности штормов в зоне возведения сооружения.

В зависимости от значений вычисленных скоростей, выбирается размер камня или щебня.

Самые оптимальные и надежные методики расчета донных скоростей основываются на учете размеров и форм фундаментных частей проектируемых сооружений.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Исследование величины местного размыва грунта дна у опор сооружений с применением физического моделирования впервые в нашей стране проводилось в НИУ МГСУ в Отраслевой научно-исследовательской лаборатории им. Н.Н. Джунковского, под руководством И.Ш. Халфина [3].

Методика определения величины размыва грунтового основания от совокупного воздействия течений и ветровых волн, основывается на сравнении значений скорости в потоке воды у сооружения, со значениями характерных скоростей, соответствующих основным стадиям движения частиц поверхностных грунтов.

Всего выделяют четыре характерных стадии:

1 стадия – потеря устойчивости небольшого числа частиц на сдвиг и опрокидывание, начало трогания с места;

2 стадия – начало массового движения частиц и образование рифелей;

3 стадия – стирание рифелей и массовое движение по морскому дну;

4 стадия – массовое движение взвешенных частиц.

С первой стадией связано понятие критической скорости. Схема размыва грунтового основания у цилиндрической опоры (свая) под воздействием течений и волнения состоит в следующем: при обтекании опоры установившимся потоком, происходит его торможение у передней грани опоры, с появлением нисходящего течения. У дна, по его периметру, образуется подковообразный вихрь. Подковообразный вихрь и формирует воронку размыва у опоры. Чем интенсивнее действие подковообразного вихря, тем глубже воронка размыва. Образующиеся боковые вихри, выносят грунт из воронки [4, 5].

Исследования по этой теме, были включены в методику предварительной оценки местных размывов дна и назначения параметров защитной отсыпки у фундаментов морских гидротехнических сооружений.

Описанная схема размыва грунтового основания при воздействии волн и течений, намного сложнее и на сегодняшний день все модели данного воздействия, достаточно приближенные. Тем более, отсутствуют и достоверные математические модели для изучения этого явления. Современная наука только подходит к четкому пониманию происходящих процессов. Поэтому, для изучения данного явления, пока остается путь физического моделирования.

Поэтому окончательное решение об устройстве защитного крепления следует принимать, основываясь на анализе результатов специальных модельных исследований, выполненных с учетом топографии дна, глубины воды и расчетных параметров волн и течений в зоне установки конкретного сооружения.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель данной работы – изучение размыва грунтового основания при воздействии волн и течений методом физического моделирования.

Основная задача данной работы: исследование величины местного размыва грунта дна у опор сквозного свайного сооружения причала Морского терминала Находкинского Завода минеральных Удобрений (Терминал), с запроектированной каменно-набросной постелью.

Методика проведения исследований – стандартная для подобного вида работ, основополагающаяся на положениях теории подобия натурного и модельного объекта, с применением критерия Фруда [6-8]. В экспериментах было задействовано оборудование фирмы HR Wallingford (Великобритания) с автоматизированной системой сбора и обработки экспериментальной информации в режиме реального времени.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Физическое моделирование проводилось в волновом лотке, в зоне конструкционных сечений 20-20 и 21-21 (рисунки 1 и 2) свайного сооружения причала морского Терминала. Масштаб модели сооружения причала в опытах составил: 1:35.

Данные режимных характеристик расчетных параметров волн (высота волны, средний период) в системе расчетного шторма в районе проектирования объекта, принимались в соответствии с III классом сооружения грузового причала и по рекомендациям СП 38.13330.2018 [1, 4]. Уровень воды 5% обеспеченности, составил значение: $H_{5\%}$ = - 0,290 м БС (натурные данные). Параметры волн шторма западного направления, 5% обеспеченности, повторяемостью 1 раз в 25 лет, составили значения: $h_{5\%}$ = 3,3 м, $T_{ср}$ = 12,5 с (натурные данные). Глубина воды у сооружения, по сечению 21-21: 15,065 м (до верхнего каменного слоя каменно-набросной постели), а до морского дна: 16,140 м. Длительность шторма западного направления: 5÷10 часов (натурные данные).

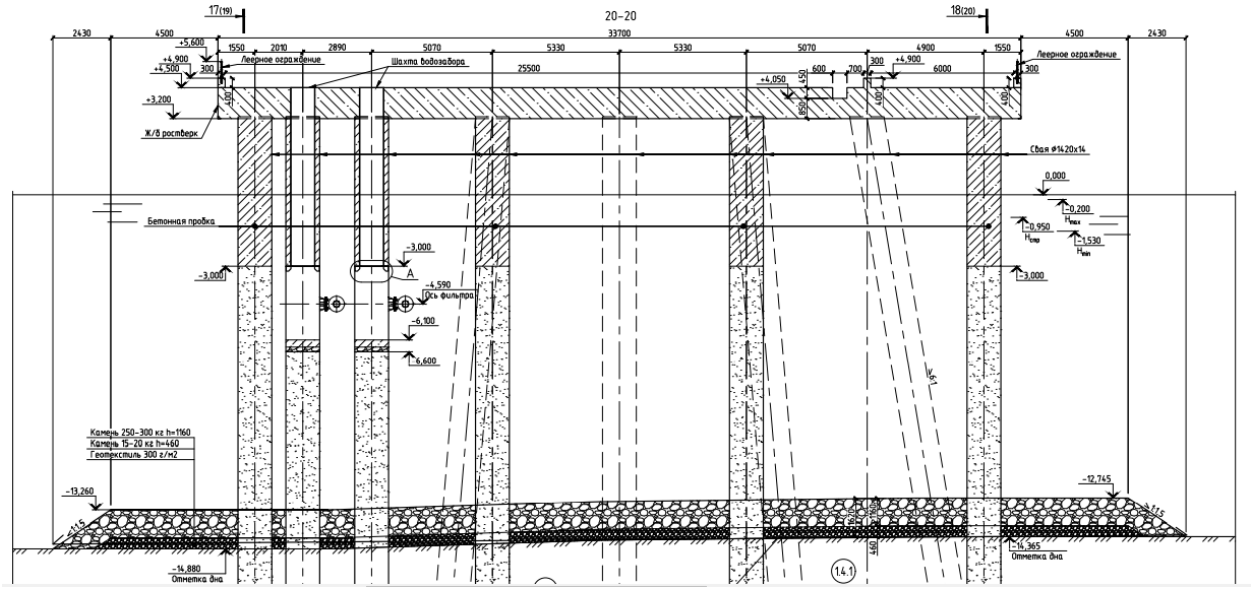

Рис. 1. Сечение 20-20 технологической площадки сооружения причала

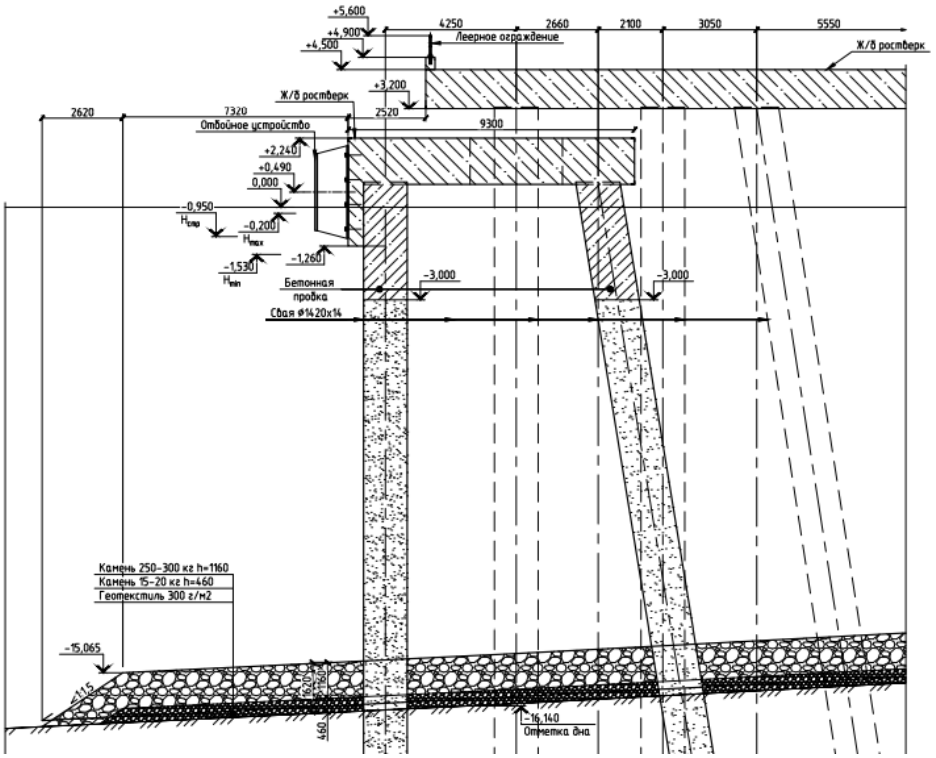

Рис. 2. Сечение 21-21 технологической площадки сооружения причала

Схематическое изображение эксперимента в волновом лотке представлено на рисунке 3.

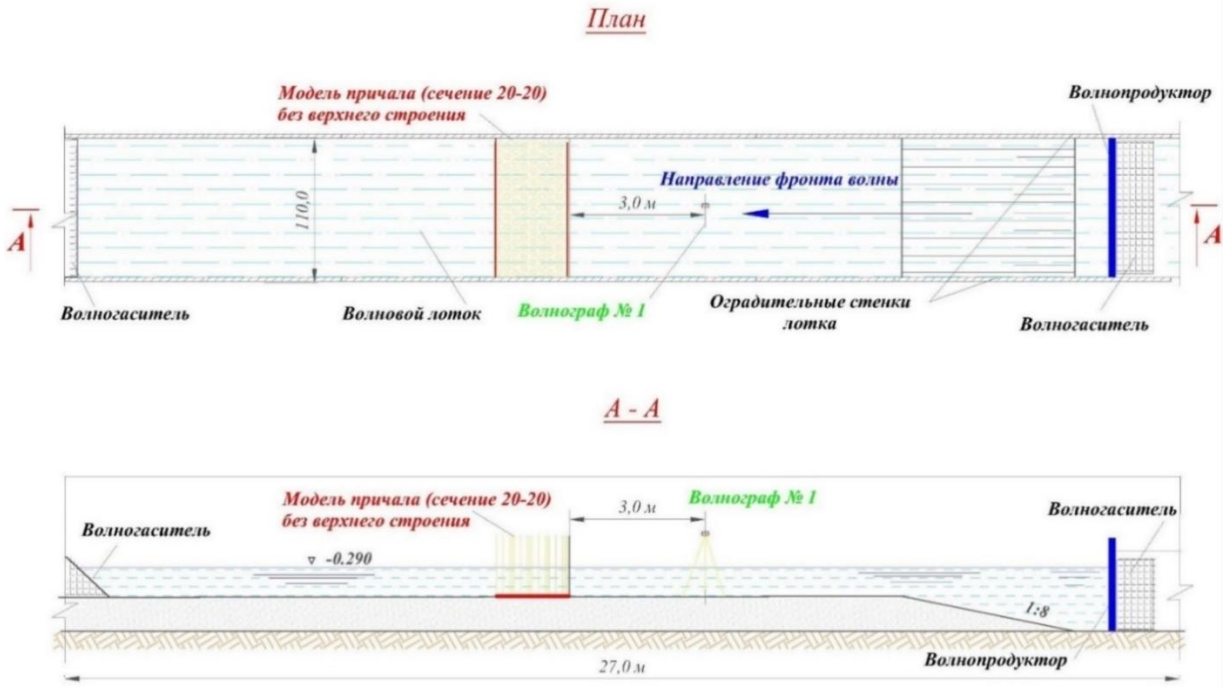

Рис. 3. Схематическое изображение экспериментальных исследований

Пересчет натурной массы камня в составе слоев каменно-набросной постели, применяемой в проекте для крепления дна – в модельную массу камня.

Крепление дна необходимо для защиты естественного дна от размыва при воздействии движителей судов у свай причала. В сторону акватории под сваями причала устраивается каменно-набросная постель, в следующем составе. На естественную поверхность дна укладывается слой геотекстиля 300 г/м^2. Сверху на него отсыпается слой камня, массой 15÷20 кг, толщиной 0,46 м. Верхний слой крепления дна состоит из камня, массой 250÷300 кг с толщиной слоя 1,16 м.

Для расчета модельной массы камня в конструкции каменно-набросной постели, в зоне сечений 20-20 и 21-21, применялись известные в инженерной практике расчетные зависимости и рекомендации СП 38.13330.2018 [1].

При гидравлическом моделировании, условия динамического подобия, следуют из второго закона Ньютона: $F = ma$.

В случае, когда движение системы происходит под воздействием только сил тяжести, имеем: $F_g = m \cdot g = \rho \cdot L^3 \cdot g$.

Отношение силы тяжести на модели, к силе тяжести в натуре: $F_g^м / F_g^н = F_\lambda = \rho_\lambda \cdot L_\lambda{}^3 \cdot g_\lambda$. В условиях обычного опыта $g_\lambda = 1{,}0$. Объемный вес γ равен произведению плотности ρ на ускорение свободного падения g: $\gamma = \rho \cdot g$. Следовательно, если щебень на модели изготовить из той же породы, что и в натуре, то $\rho_\lambda = 1{,}0$. В этом случае: $F_g^м = F_g^н \cdot L_\lambda^3$. В нашем случае: $L_\lambda = 1/35$.

Масса камня в натуре для первого слоя откоса равна: $m_н = 250 \div 300$ кг (рисунки 1 и 2). Вес камня в натуре: $P_н = (250 \div 300) \cdot 9{,}81 = 2452 \div 2943$ Н.

Объем шара равен: $V_ш = (4/3)\pi \cdot R^3 = (4/3)\pi(D/2)^3 = (4/24)\pi \cdot D^3 \approx 0{,}5236D^3$, где D – диаметр шара.

Объемный вес камня $\gamma = 2600$ кг/м^3. Объем одного характерного камня в натуре: $V_к^н = (250 \div 300)/2600 = 0{,}096 \div 0{,}12$ м^3.

Диаметр щебня в натуре:

$$D_к^н = \sqrt[3]{\frac{(0{,}096 \div 0{,}12)}{0{,}5236}} = 0{,}57 \div 0{,}61 \text{ м.}$$

Диаметр щебня на модели:

$D_к^м = (0{,}57 \div 0{,}61)/35 = 0{,}016 \div 0{,}017$ м $= 16{,}0 \div 17{,}0$ мм.

Масса такого размера щебня составила:

$m_к^м = (250 \div 300)/35^3 = 0{,}006 \div 0{,}007$ кг $= 6{,}0 \div 7{,}0$ г.

Масса камня второго слоя каменно-набросной постели составляет 15÷20 кг (рисунки 2 и 3).

Объемный вес камня γ = 2600 кг/м^3. Объем одного характерного камня в натуре: $V_к^н$ = (15 ÷ 20) /2600 = 0,0057 ÷ 0,0077 м^3.

Диаметр щебня в натуре:

$$D_к^н = \sqrt[3]{\frac{(0{,}0057-0{,}077)}{0{,}5236}} = 0{,}01 \div 0{,}011 \text{ м}.$$

Диаметр щебня на модели:

$D_к^м$ = (0,01 ÷ 0,011)/35 = 0,2 ÷ 0,3 мм.

$m_к^м$ = (15 ÷ 20) /35^3 = 0,0003 ÷ 0,0005 кг = 0,3 ÷ 0,5 г.

На рисунках 4 и 5 представлено свайное поле грузового причала в зоне сечения 20-20 и 21-21. Камни верхнего слоя в подпричальном откосе покрыты красной краской – для лучшего визуального отслеживания смещения по откосу отдельных камней верхнего защитного слоя. В случае разрушения подпричального откоса и перемешивания слоев камня верхнего и нижележащего слоев, этот результат, так же, будет хорошо визуализирован.

Рис. 4. Вид модели свайного поля грузового причала с подпричальным откосом

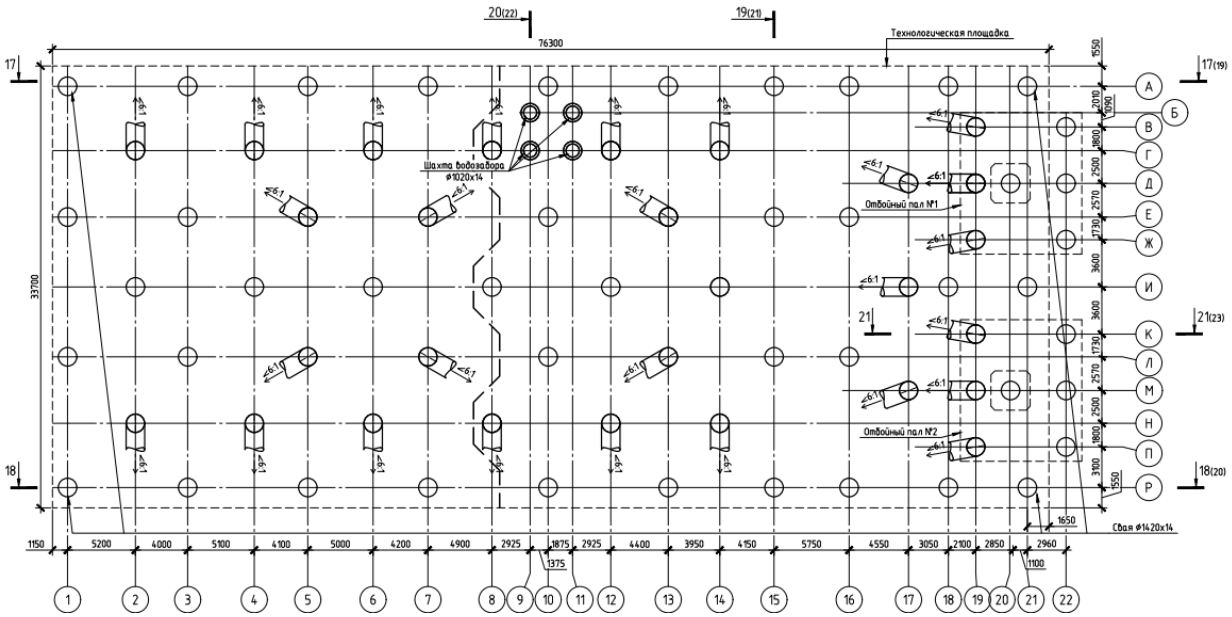

Рис. 5. Свайное поле технологической площадки сооружения причала

В экспериментах применялся один волнограф. Волнограф № 1 (В1) устанавливался на расстоянии 3 м до модели (рисунки 3 и 6), ближе к волнопродуктору, для контроля соответствия генерируемых параметров волнения – заданным. В таблице 1 приведены результаты тарировки

волнового датчика.

Таблица 1. Таблица тарировки волнографа № 1 в экспериментах

№ волнографа п/п	Калибровочный коэффициент *K*, м/В	R^2, %
1	0,0121441	0,9932

Рис. 6. Датчик-волнограф В1 в рабочем положении

Перед экспериментами производился замер расстояния от оголовка каждой пронумерованной сваи свайного поля (рисунок 7) до уровня каменной наброски каменно-набросной постели с внесением числовых значений в таблицу 2 экспериментальных данных в графу «до эксперимента». По окончании заданного периода волнового воздействия шторма западного направления на модель причала (6 часов в натурных единицах), осуществлялись аналогичные замеры, с внесением в графу таблицы «после эксперимента».

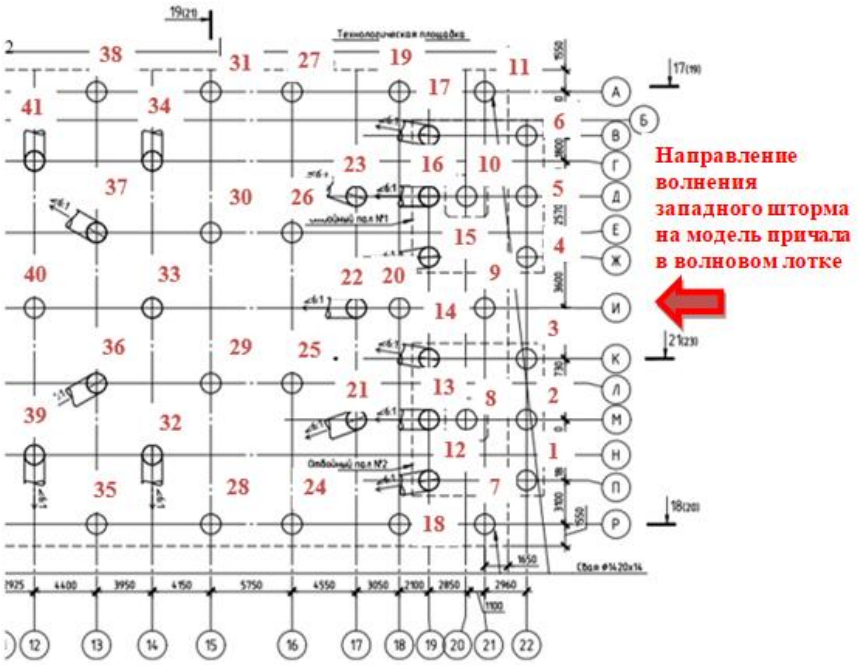

Рис. 7. Нумерация свай сооружения причала

На основании полученных экспериментальных данных, была составлена таблица 2 изменения расстояния от оголовка каждой пронумерованной сваи свайного поля до уровня каменной наброски каменно-набросной постели.

Таблица 2. Таблица изменения поверхности каменно-набросной постели в экспериментах

№ сваи п/п	Замер до эксперимента, мм	Замер после эксперимента, мм
1	535,0	532,0
2	535,0	532,0
3	560,0	558,0
4	550,0	549,0
5	545,0	543,0
6	540,0	538,0
7	560,0	558,0
8	525,0	523,0
9	540,0	539,0
10	550,0	548,0
11	535,0	534,0
12	520,0	519,0
13	510,0	509,0
14	550,0	548,0
15	490,0	488,0
16	510,0	509,0
17	500,0	497,0
18	500,0	498,0
19	500,0	499,0
20	500,0	498,0
21	510,0	509,0
22	565,0	564,0
23	530,0	530,0
24	515,0	515,0
25	510,0	510,0
26	475,0	475,0
27	525,0	525,0
28	445,0	445,0
29	520,0	520,0
30	525,0	525,0
31	535,0	535,0
32	500,0	500,0
33	505,0	505,0
34	515,0	515,0
35	505,0	505,0
36	515,0	515,0
37	510,0	510,0
38	515,0	515,0
39	475,0	475,0
40	505,0	505,0
41	520,0	520,0

Экспериментальные исследования приведены на рисунке 8.

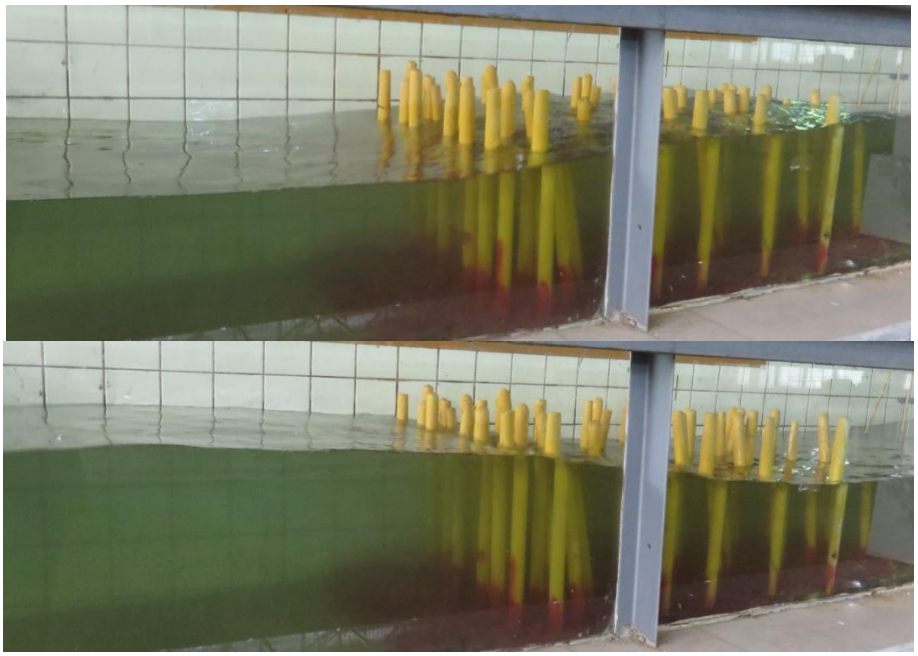

Рис. 8. Экспериментальные исследования

Волновая реализация с волнографа № 1, полученная в экспериментальных исследованиях, приведена на рисунке 9.

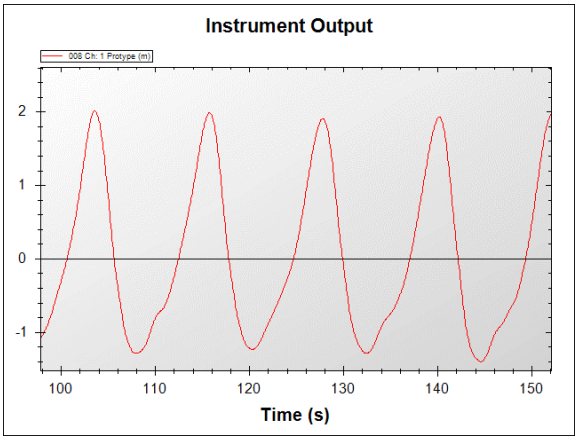

Рис. 9. Волновая реализация с датчика-волнографа В1
$h_{5\%}$ = 3,3 м, $T_{ср}$ = 12,5 с (натурные данные)

ВЫВОДЫ

На основании проведенных экспериментов по исследованию величины местного размыва грунта дна у опор сквозного свайного сооружения причала в зоне сечений 20-20 и 21-21 морского терминала в волновом лотке, было выявлено:

- сброс элементов каменной защитной наброски каменно-набросной постели в экспериментах отсутствовал (рисунок 10).

Рис. 10. Вид подпричального откоса после эксперимента

В соответствии с этим, следует вывод, что в процессе экспериментов камень был абсолютно устойчив, его шевеления в защитной наброске нет.

Величина местного размыва (изменения) составляющих конструкции каменно-набросной постели у опор сквозного свайного сооружения модели грузового причала - незначительна (таблица 2) и не окажет существенного влияния на устойчивость сооружения причала. Таким образом, общая устойчивость конструкции каменно-набросной постели обеспечивается и ее дополнительного укрепления не требуется.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Опыт строительства нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений в суровых условиях арктических регионов, показал, что стоимость защиты от размыва грунта, может составлять более половины стоимости всего строительства морского гидротехнического сооружения. Но, в сопоставлении со стоимостью подводно-технических работ, в случае образования размывов, при недостаточной проработке защиты или ее отсутствии, расходы будут еще более значительней.

Поэтому, представляется необходимым и далее проводить экспериментальные исследования по оценке размыва поверхностных слоев донного грунта под воздействием ветровых волн и течений.

При условии получения большого объема экспериментальных данных по данной теме, возможна разработка дополнений и уточнений в действующие нормативные документы.

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 38.13330.2018. Свод правил. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов): введен 17.02.2019. – М.: Минрегионразвития РФ, 2018. – 102 с.

2. СП 287.1325800.2016. Свод правил. Сооружения морские причальные. Правила проектирования и строительства: введен 17.06.2017. – М.: Минстрой России, 2016. – 204 с.

3. Халфин, И.Ш. Воздействие волн на морские нефтегазопрпомысловые сооружения / И.Ш. Халфин. – Москва: «Недра», 1990. – 312 с.

4. Моргунов, К.П. Лабораторные исследования процессов размыва и намыва грунта в районе размещения мостовых опор / К.П. Моргунов, Ю.К. Ивановский , В.Г. Богатырёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 15(6). – С. 971-986. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-971-986. 2023.

5. Morgunov, K. Experimental studies of the kinematics flow and bottom’s reformations in the area of bridge pier during the construction of the bridge crossing / K. Morgunov, G. Gladkov, Y. Ivanovsky //

Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. – 2021. – Vol. 2131, Is. 3. – p. 032064. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032064.

6. ГОСТ Р 70023-2022. Физическое моделирование волновых воздействий на портовые гидротехнические сооружения. Требования к построению модели, проведению экспериментов и обработке результатов. – Введ. 2022–09–01. – М.: Росстандарт, 2022. – 8 с.

7. Rogachko, S.I. Scientific support of projects of Offshore hydraulic structures / S.I. Rogachko, N.V. Shunko // Power Technology and Engineering. –2022. – Vol. 56, No. 1. – pp 1-5. – DOI 10.1007/s10749-023-01461-8.

8. Тлявлина, Г.В. Портовые гидротехнические сооружения: требования к физическому моделированию волновых воздействий / Г.В. Тлявлина, Р.М. Тлявлин, Е.А. Вялый // Транспортное строительство. – 2022. – № 3. – С. 24-26.

STUDY OF THE LOCAL EROSION OF THE BOTTOM SOIL AT THE SUPPORTS OF THE THROUGH-PILING STRUCTURE OF THE BERTH

[1]Shunko N.V., [2]Shunko A.A.
[1, 2]National Research Moscow State University of Civil Engineering

Annotation. The paper presents the results of a study of the magnitude of local erosion of the bottom soil at the supports of a through structure of a vertical profile berth in a wave chute. The structure in question is a berth and is part of the hydraulic structures of the Marine Terminal of the Nakhodka Mineral Fertilizer Plant. The design provides for a rockfill bed at the base of the berth. Based on the analysis of the results of physical modeling (laboratory studies), the magnitude of local erosion (change) of the components of the rockfill bed structure at the supports of the through pile structure of the cargo berth model was determined. An assessment of the effect of experimentally determined local erosion on the stability of the berth structure is given.
Keywords: through-type berth, marine terminal, piles, wave parameters, physical modeling, storm risk, bottom soil erosion.