

Модельные исследования размыва грунта у опорных оснований морских сооружений топливно-энергетического комплекса

Л. Г. Щемелинин¹, В. И. Денисов², К. Е. Сазонов³

«Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

Работы по исследованию размыва грунта около опорных оснований морских технических сооружений гравитационного типа посредством модельных испытаний проводятся в мелководном опытовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» с 2000 г. Поскольку этот бассейн не был изначально предназначен для проведения таких экспериментов, он был дополнительно оснащён специальным экспериментальным оборудованием. Также были разработаны и опробованы методы проведения модельных испытаний по исследованию размыва грунта около установленных на нём объектов. Доклад содержит обзор таких исследований, знакомит с используемым оборудованием, методами проведения модельного эксперимента и подсчёта его результатов на натуре, опытом проведения таких экспериментов.

Ключевые слова: морские технические сооружения, размыв грунта, модельные исследования

Modeling Researches of Soil Erosion near Foundations of Offshore Structures. *Leonid G. Shchemelinin, Valeriy I. Denisov, Kirill E. Sazonov. Krylov Shipbuilding Research Institute, Saint-Petersburg.*

Works on research of soil erosion process near foundations of gravitational type offshore structures by means of carrying out of modeling tests are carried out in KSRI shallow water towing tank since 2000. As this towing tank initially didn't intend for carrying out of such experiments, the special experimental means have been created. Also methods of carrying out of modeling experiments on research of washout of a soil near the objects established on it have been developed and tested. The report contains the review of such researches executed in KSRI, acquaints with the used equipment, modeling technics and scale recalculation of test results, the received experience of carrying out of the experiments.

Keywords: offshore structures, a washout of the soil, modeling experiments

Введение

Подавляющее большинство морских сооружений ТЭК России, предназначенных для разведки запасов и добычи углеводородного сырья, расположены в относительно мелководной зоне российского шельфа. Как правило, в мелководной зоне морские сооружения устанавливаются на дне водоема, поэтому задача обеспечения устойчивости сооружения на грунте является одной из важнейших для обеспечения безопасности его эксплуатации.

¹ *Щемелинин Леонид Георгиевич, начальник сектора.*

² *Денисов Валерий Иванович, зам. начальника лаборатории.*

³ *Сазонов Кирилл Евгеньевич, д.т.н., начальник лаборатории.*

Снижение устойчивости сооружения на грунте может произойти вследствие размыва грунта у его опорного основания и/или под ним, который возникает от действия течения и волнения, а также от струй воды, возбуждаемых работой движительных комплексов судов. Информация об особенностях размыва грунта у опорного основания морского сооружения, полученная на начальных стадиях его проектирования, позволяет разработать технические решения по предотвращению или полному исключению этого опасного явления при эксплуатации сооружения.

Изучение размыва грунта на ранних стадиях проектирования морских сооружений осуществляется с помощью методов математического и физического моделирования. В данной работе представлены модельные технологии исследования размыва грунта, разработанные и применяемые во ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

2

Дооборудование мелководного опытового бассейна

В 2000 году во ФГУП «Крыловский государственный научный центр» была проведена модернизация мелководного опытового бассейна для проведения исследований по размыву грунта. Для выполнения указанных исследований бассейн был выбран потому, что в нем технологически предусмотрена возможность изменения уровня воды, вплоть до полного осушения бассейна, а также имеется пневматический генератор регулярного волнения (волнопродуктор). Модернизация бассейна заключалась в создании специальной экспериментальной площадки, на которой можно моделировать участки дна морской акватории с установленной на нем моделью сооружения.

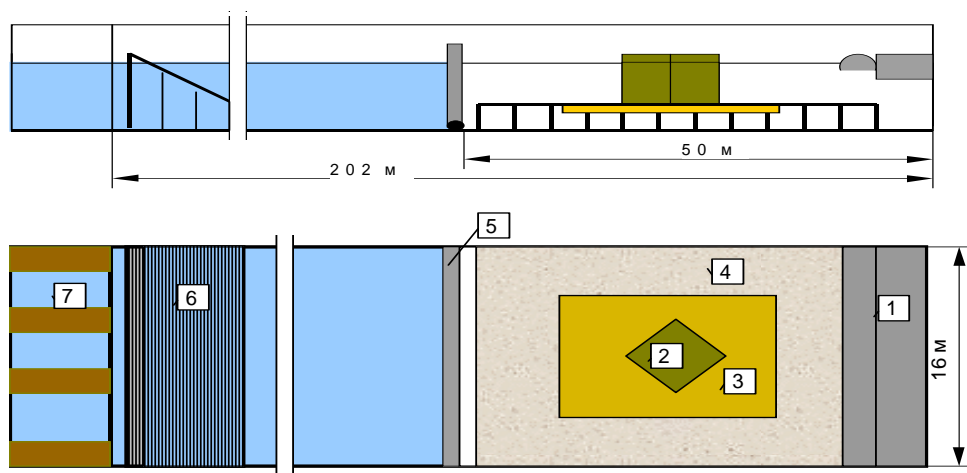


Рис. 1. Схема мелководного опытового бассейна с площадкой для моделирования морского дна. Цифрами на схеме обозначены: 1. Волнопродуктор; 2. Модель платформы; 3. Модель грунтового основания; 4. Второе дно; 5. Опускаемый затвор; 6. Волногаситель; 7. Доковая часть бассейна



Площадка для моделирования морского дна была создана в торцевой части бассейна, недалеко от волнопродуктора. Эта площадка представляет собой второе дно бассейна, изготовленное из бакелизированной фанеры и смонтированное на деревянной обрешётке. В средней части площадки располагается прямоугольное окно размером $18,35 \times 9,0$ м, которое заполнено мелкозернистым песком. Глубина слоя песка составляет 0,38 м. Схема мелководного опытового бассейна с площадкой для моделирования морского дна представлена на рис. 1.

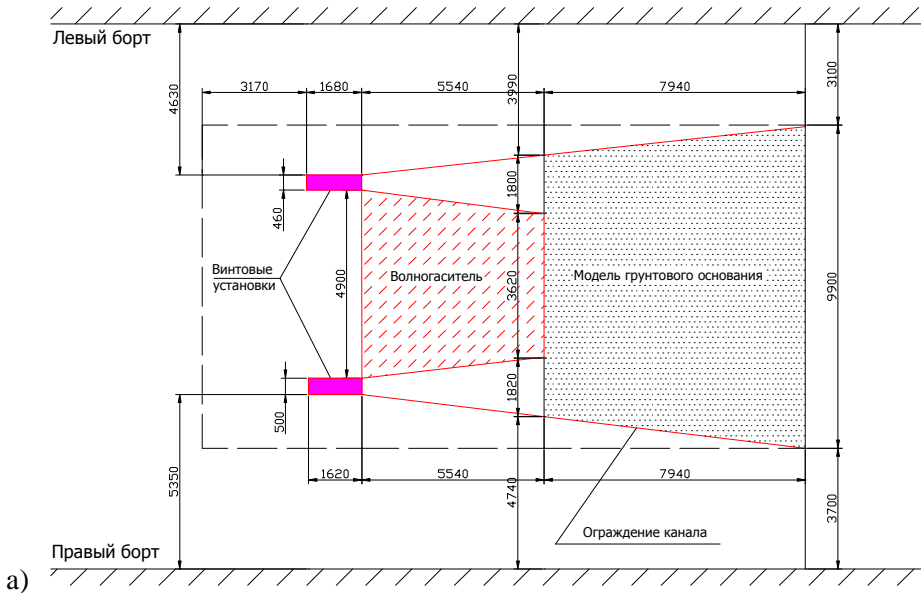


Рис. 2. Схема установки для создания течения (а) и её внешний вид (б).

Разработанные экспериментальные технологии позволяют изучать воздействие на грунт таких факторов, как волнение, течение, работа движителей пришвартованных к сооружению судов. Регулярное волнение создает-



ся в бассейне с помощью пневматического волнопродуктора, позволяющего создавать волну длиной $1 \div 10$ м и высотой $0,02 \div 0,35$ м, при крутизне $1/20 \div 1/60$ в диапазоне глубин воды от 0,6 до 1,75 м. В настоящее время в институте планируются работы по модернизации волнопродуктора с целью расширения его возможностей для создания в бассейне нерегулярного волнения с заданными спектральными характеристиками.

В 2005 г., когда впервые возникла необходимость проведения исследований размыва грунта при совместном воздействии волнения и течения, для создания такой сложной системы не было ни времени, ни средств. В этих условиях было принято решение попытаться создать течение в построенном внутри бассейна, в районе площадки для моделирования морского дна, сужающемся канале. Широкий конец этого канала был направлен в сторону волнопродуктора, а в его противоположном конце располагались две установки для испытания моделей гребных винтов в «свободной воде», поставленные на специальные рамы-подставки и оснащенные гребными винтами диаметром 240 мм каждая. Между ними размещен дополнительный волногаситель, представляющий собой наклонную поверхность с поперечными рейками. Работающие гребные винты «отсасывали» воду из канала, создавая течение над песком. Регулируя их частоту вращения, можно было регулировать и скорость течения в канале. При этом создаваемые волнопродуктором волны могли входить в канал с его широкой стороны и также оказывать воздействие на песок. Схема установки представлена на рис. 2а, а её фотография – на рис. 2б.

2

Модельные испытания по определению размыва грунтового основания у платформ проводятся на регулярном волнении и течении с параметрами, соответствующими равенству на модели и натуре отношения критических (неразмывающих) скоростей и скоростей у дна от волнения и течения. При невозможности достичь такого равенства используется явление автомодельности по критерию подвижности частиц грунтового основания.

Основные принципы физического моделирования размыва грунта

При модельных исследованиях взаимодействия гидравлического потока с грунтовым основанием используют понятие коэффициента подвижности K_{mob} , определяемого выражением

$$K_{mob} = \frac{U_b(x, y)}{U_{cr}}, \quad (1)$$

где: $U_b(x, y)$ – придонная скорость потока в рассматриваемой точке; U_{cr} – придонная неразмывающая скорость (на высоте выступов шероховатости).

Для подобия при моделировании процессов размыва необходимо, чтобы в модельных и натуральных условиях коэффициент подвижности K_{mob} был одинаков:

$$(K_{mob})^{nat} = (K_{mob})^{mod} \quad (2)$$



При совместном действии волн и установившегося течения соотношение между придонной скоростью на модели и в натуре не полностью соответствует закону Фруда. Это связано с различием профилей скоростей по высоте и разной относительной шероховатостью поверхности дна. Для волнового потока различием в шероховатости можно пренебречь и принимать, что донная скорость определяется на основе линейной теории волн. Для установившегося потока различие профилей является существенным. Необходимо учитывать, на какой высоте произведено измерение скорости.

Сооружение, установленное в водной среде, вносит возмущение в исходное поле скоростей. Вблизи сооружения, особенно около угловых точек, местные скорости выше, чем на отдаленных границах. Поэтому в непосредственной близости от сооружения местный размыв дна начинается раньше, чем скорость потока на отдаленных границах достигает значения неразмывающей скорости. При увеличении скорости глубина и скорость размыва вначале увеличиваются. После того как скорость потока на отдаленной границе превысит значение неразмывающей скорости в 1,4...1,5 раз, начинается общее движение наносов по всей площадке, и местный размыв продолжается уже на фоне этого общего размыва. Увеличение ям размыва замедляется, а затем, при $K_{mob} \approx 2$, прекращается, наступает баланс извлекаемых из ямы размыва и поступающих в нее наносов. Таким образом, при $K_{mob} > 1,5...2,5$ глубина размыва не зависит от K_{mob} . Это явление называется автомодельностью по параметру K_{mob} и широко используется при исследованиях на физических моделях [1÷4]. Для обеспечения подобия при исследованиях размыва достаточно увеличивать на моделях скорость установившегося течения и высоту волны лишь до такой степени, чтобы $K_{mob} \geq 2$.

Согласно критериям динамического подобия для моделирования процессов деформации грунта требуется подбор легкоподвижного заменителя его с плотностью частиц, незначительно превышающей плотность жидкости [5], [6]. Его подбор производится таким образом, чтобы удовлетворить условиям $U/U_{cr} = idem$ или $U/w = idem$, где U – характерная скорость течения, w – гидравлическая крупность частиц грунта, U_{cr} – скоростной порог страгивания частиц грунта (неразмывающая или срывающая скорость). Первый из этих критериев характеризует устойчивость частиц на дне, а второй – их подвижность.

При проведении испытаний в бассейне на волнении использование легкоподвижного заменителя сопряжено с чрезвычайно большими сложностями. Поэтому в мировой практике исследований деформаций мелкопесчаных грунтов нередко идут на использование в качестве модельного грунта мелкопесчаного же грунта, близкого по свойствам натурному грунту [1]. В этом случае на модели воспроизводится лишь качественная картина процесса деформаций грунта. Для проведения же количественных оценок и интерпретации результатов модельного эксперимента на натуре необходимо форсирование гидравлических режимов течения или выполнение масштабной серии опытов.

Модельный мелкопесчаный грунт подбирается из соображений, чтобы его неразмывающая скорость была по возможности наименьшей. Тогда, форсируя скорость течения воды в модельных условиях, можно приблизить-



ся к условиям автотельности по критерию начала трогания грунта. На основании этих требований для проведения исследований был использован песок марки $3K_3O_3O_2$ со средним диаметром частиц $d_{mid} = 0,222$ мм.

Высота генерируемой в бассейне волны и время работы волнопродуктора выбирается исходя из условий:

– обеспечения на модели режимов обтекания, при которых критерии подвижности частиц грунта на модели и натуре наиболее близки (форсирование режимов течения) и находятся в режиме автотельности;

– обеспечения длительности воздействия течения и волнения, эквивалентного при пересчете на натуру непрерывному шторму, соответствующему заданному району.

Неразмывающие скорости рассматриваются для средней по глубине скорости установившегося потока, они определяются в соответствии с известными соотношениями гидравлики потоков [5, 6].

2

Технология измерения рельефа поверхности донного грунта

Одной из важных задач, которые были решены в процессе разработки технологии экспериментальных исследований по моделированию размыва грунта около опорных оснований морских буровых платформ, является задача измерения рельефа поверхности моделирующего морской донный грунт песка в процессе эксперимента и после его завершения.

Во ФГУП «Крыловский государственный научный центр» была разработана уникальная гидроакустическая система отображения рельефа дна, позволяющая проводить измерения на сверхмалых глубинах – от 0,2 м. Входящий в состав системы приемоизлучающий акустический датчик излучает короткие по длительности ($\tau=50$ мкс) акустические сигналы в узком секторе углов ($\Delta\varphi\sim 3^\circ$). Отраженные от дна сигналы принимаются этим же датчиком и после усиления и преобразования передаются в компьютер. Глубина в месте нахождения акустического датчика определяется по временной задержке между излученными и отраженными сигналами по точкам пересечения переднего фронта сигналов с пороговым уровнем. Погрешность измерения глубины ± 2 мм, а погрешность измерения продольного перемещения ± 20 мм. Для исключения влияния амплитуды отраженного сигнала на погрешность измерения глубины в схеме используется автоматическая регулировка усиления, что позволяет получать отраженные сигналы равной амплитуды независимо от глубины и рельефа дна.

Приемоизлучающий акустический датчик крепится на подвижной каретке поперечной фермы, установленной на буксировочной тележке опытового бассейна, таким образом, что буксировочная тележка является для него «координатным устройством». После установки датчика в заданное положение по ширине бассейна (поперечная координата), буксировочная тележка выполняет движение с одновременной записью в компьютер сигнала с аку-



стического датчика и синхронизированного сигнала с датчика перемещения буксировочной тележки (продольная координата). В результате одного прохода регистрируется продольный профиль дна при заданной поперечной координате. Затем каретка с датчиком переводится в положение, соответствующее следующей поперечной координате, и буксировочная тележка совершает следующий проход.

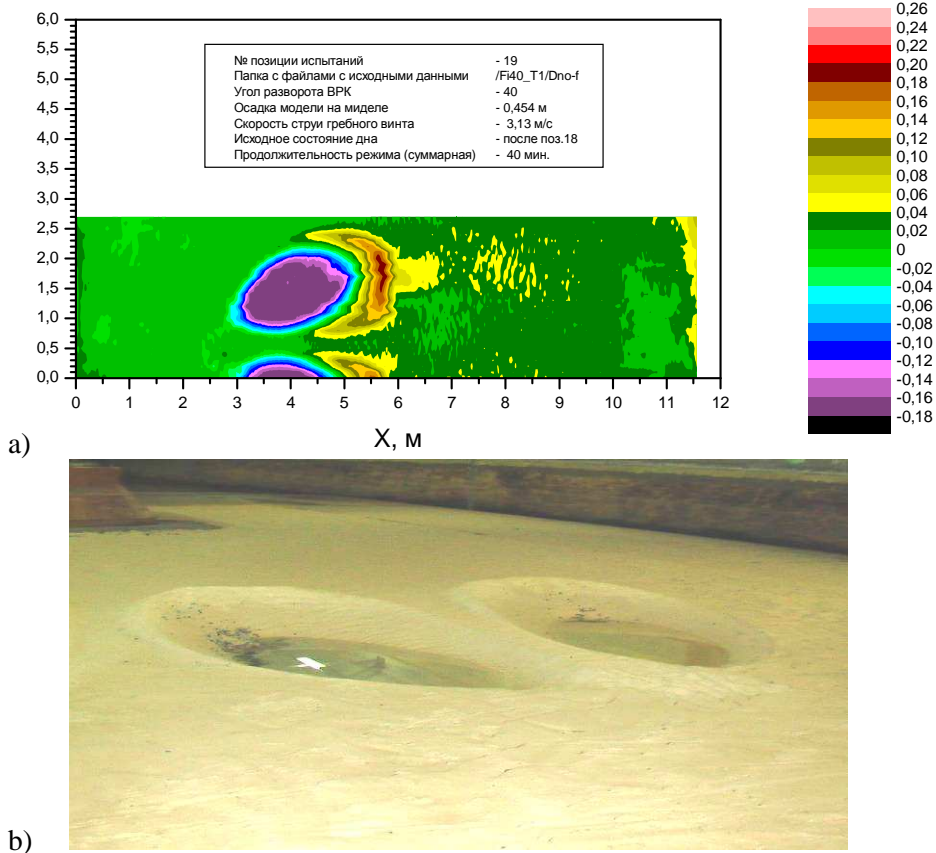


Рис. 3. Трехмерная картина размыва (а) и фотография участка дна (б) после воздействия на него струй от работающих гребных винтов модели судна

Все полученные на каждой траектории движения акустического датчика профили с помощью компьютерной программы формировали структуру графического представления донной поверхности. По полученным профилограммам, с соблюдением масштаба по трем координатам, строится трехмерная диаграмма поверхности дна, представленная на рис. 3(а). Рядом, на рис. 3(б) приведена фотография этого участка дна.

Особенностью описанного способа измерения рельефа дна является то, что гидроакустический датчик в процессе своей работы должен находиться в воде, поэтому все замеры производятся без слива воды из бассейна. При необходимости изучения длительного воздействия на грунт волнения,

течения или струй от движителей судов это позволяет проводить промежуточные измерения и следить за динамикой развития процесса размыва грунта. После завершения позиции эксперимента воду сливают для выравнивания грунта перед следующей позицией. Недостатком указанного способа является то, что он не позволяет производить измерения непосредственно вблизи установленной на дно модели платформы и под ней.

При проведении исследований размыва грунта около опорных оснований морских буровых платформ в результате воздействия волнения и течения практический интерес представляет изменение рельефа поверхности дна непосредственно около объекта, а также под ним. Наиболее актуальны при этом площадь потери опорной поверхности основания платформы и оголение удерживающих свай (при их наличии), поскольку эти параметры определяют устойчивость всего сооружения на грунте, а значит и безопасность его эксплуатации.

В соответствии с разработанной технологией измерение параметров размыва грунта в непосредственной близости от опорного основания и под ним выполняется после окончания эксперимента и слива воды из бассейна. Точное измерение рельефа поверхности позволяют выполнить современные системы бесконтактного измерения геометрических параметров различных объектов. При исследованиях размыва в мелководном бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» используется оптическая система ATOS II фирмы GOM mbH (Германия).

Ниже приводятся результаты применения оптической системы при исследовании размыва грунта в результате воздействия волнения и течения на защитный кессон морской ледостойкой буровой установки (МЛБУ).

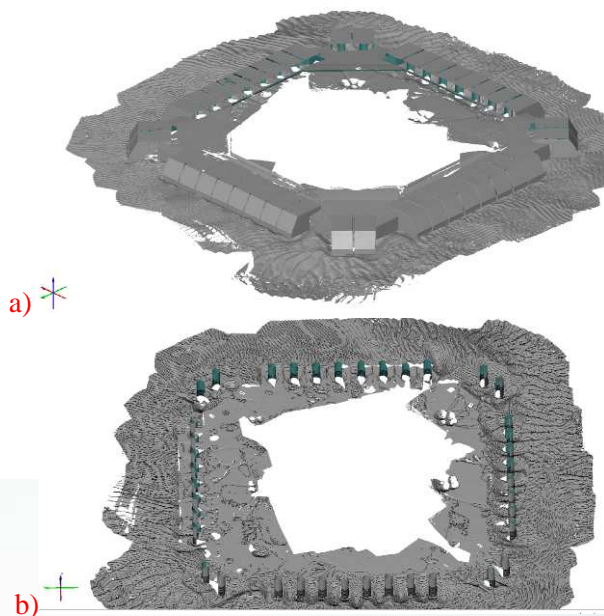


Рис. 4. Изображения зон размыва грунта у защитного кессона МЛБУ (а) и под ним (б)

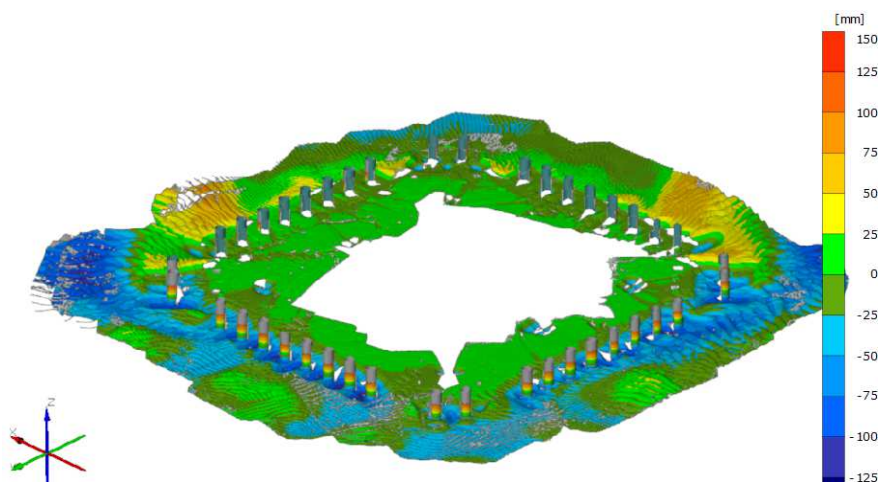


Рис. 5. 3D диаграмма зон размыва грунта под защитным кессоном МЛБУ.

На рис. 4а представлено полученное в результате измерений, выполненных с помощью аппаратуры ATOS II, изображение поверхности песчаного дна около модели защитного кессона МЛБУ до её удаления, а на рис. 4б – изображение поверхности песчаного дна после удаления модели защитного кессона МЛБУ. Непосредственно на проведение измерений было затрачено около 4 часов.

В результате обработки, выполненной с помощью программного обеспечения, прилагаемого к аппаратуре ATOS II, были получены 3D диаграммы, иллюстрирующие рельеф поверхности песчаного дна. Пример такой диаграммы приведен на рис. 5.

Способ пересчёта результатов эксперимента на натуре

Способы интерпретации результатов модельных испытаний на условия природы зависят главным образом от соотношения основных критериев подобия. Для исследования размывов при обеспечении геометрического подобия и одинаковом типе грунтов такими критериями являются число Фруда F_n , коэффициент подвижности наносов, K_{mob} и число Калегана-Карпентера, KC , определяемое по формуле

$$KC = U_w \tau / B, \quad (3)$$

где U_w – расчетная скорость при волнении; τ – период волн; B – характерная ширина элементов преграды.

Если бы все эти критерии оказались одинаковыми в натуре и на модели, то пересчет результатов с модели на натуре можно было бы выполнить простым умножением параметров, характеризующих размыв, на масштабные коэффициенты подобия. Однако выполнить указанное условие практически невозможно.

Применяемый метод пересчёта результатов модельного эксперимента на натуре изложим на примере результатов исследований размыва грунта около опорного основания морской ледостойкой буровой установки



(МЛБУ), выполненных в 2008 г, применительно к одной из возможных площадок её установки.

Модель МЛБУ была выполнена в масштабе 1:30. Соответствующие масштабные коэффициенты моделирования кинематических параметров приведены в табл. 1.

Таблица 1
Масштабные коэффициенты моделирования кинематических параметров

Величина	Обозначение масштаба	Формула	Значение для пересчета с модели на натуру
Линейный размер, L	λ_L		30
Интервалы времени, T	λ_T	$\lambda_T = \sqrt{\lambda_L}$	5,48
Скорость, U	λ_U	$\lambda_U = \sqrt{\lambda_L}$	5,48

Рассмотрим значения указанных критериев в натуральных расчетных условиях эксплуатации МЛБУ и значения, которые могли быть достигнуты при моделировании. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2
Параметры волн и установившегося течения, придонные скорости, коэффициент подвижности наносов и основные критерии подобия

Условия работы	Глубина воды	Расчетная высота волн	Расчетная длина волны	Амплитуда волновой скорости у дна, м/с ¹⁾	Приведенная придонная скорость при волнении с учетом коэффициентов ²⁾	Скорость установившегося течения на высоте измерения ³⁾	Придонная скорость установившегося течения ⁴⁾	Придонная скорость с учетом установившегося течения и волн ⁵⁾	Неразмывающая придонная скорость ⁶⁾	Коэффициент подвижности наносов	Число Фруда	Число Калегана-Карпентера
Обозначение	H	h	λ	$A_{w,b}$	$U_{w,b}$	$U_{c,ref}$	$U_{c,b}$	U_b	$U_{b,n}$	K_{mob}	Fn	KC
Ед. изм	м	м	м	м/с	м/с	м/с	м/с	м/с	м/с	-	-	
Верхний слой – ил глинистый в натуре, мелкозернистый песок на модели												
натура	9,1	2,1	40,7	0,64	0,24	0,59	0,17	0,41	0,24	1,74	0,0122	0,028
модель	0,25	0,11	1,79	0,27	0,07	0,3	0,1	0,17	0,07	2,65	0,0277	0,089
Подстилающий слой – ил суглинистый в натуре, мелкозернистый песок на модели												
натура	9,1	2,1	40,7	0,64	0,24	0,59	0,17	0,41	0,29	1,4	0,0122	0,028
модель	0,25	0,11	1,79	0,27	0,07	0,3	0,1	0,17	0,07	2,65	0,0277	0,089

Примечания:

- ¹⁾ Амплитуда волновой скорости определена по линейной теории волн;
- ²⁾ Амплитуда волновой скорости умножена на коэффициенты $a_{w,t} = 0,75$, $a_{w,b} = 0,5$;
- ³⁾ Высота (от дна) изменения скорости: в натуре 0,5 м, на модели 0,02 м;
- ⁴⁾ Придонная скорость определяется на высоте шероховатостей;
- ⁵⁾ Сумма придонных скоростей от установившегося течения и волн;
- ⁶⁾ Неразмывающая придонная скорость.



В районе предполагаемой установки МЛБУ верхний и подстилающий слои дна сложены текучими илами с разными физическими и физико-механическими характеристиками. Поскольку типы грунтов одинаковы и размывающие скорости близки между собой, то в расчетном отношении донные грунты могут рассматриваться как однослойные.

Коэффициенты подвижности для условий природы в 1,5 раза для верхнего и 1,9 раза для подстилающего слоя меньше, чем для модели. Поскольку значения этих коэффициентов и на модели и в природе превышают значение 1,4, то они находятся в автомодельной области [7]. Следовательно, границы ям размыва на модели и в природе геометрически подобны. Если размыв возникает на модели, то его следует ожидать и в природных условиях. Относительная потеря опорной площади на модели и в природе одинакова. Число Фруда на модели в $0,0277/0,0122=2,27$ раза больше, чем на природе. Число Калегана-Карпендера на модели в $0,089/0,028=3,1$ раза больше, чем на природе. С увеличением числа Фруда размываемость возрастает. Согласно [8], глубина размыва при установившемся течении пропорциональна множителю $Fr^{0,83(H/B)^{0,34}}$. По исследованиям [9,10] глубина размыва при волнении пропорциональна \sqrt{KC} . Пересчет глубины размыва с модели на природу рекомендуется производить по формуле

$$(H_s)^{nat} = k_{gr} \lambda_L \left[K_w \sqrt{\frac{KC^{nat}}{KC^{mod}}} + K_c \left(\frac{Fr^{nat}}{Fr^{mod}} \right)^{0,83(H/B)^{0,34}} \right] (H_s)^{mod} \quad (4)$$

где H_s – глубина ям размыва; K_w , K_c – весовые коэффициенты скоростей, вызванных волнением и установившимся течением в составе суммарной скорости; k_{gr} – коэффициент, учитывающий разницу в размываемости песчаных и глинистых грунтов. При переходе от песка на модели к глинистым грунтам в природе этот коэффициент принимается равным 0,6 [11÷13].

С учетом данных в табл. 2 и формулы (4) в рассмотренной акватории глубины ям размыва пересчитываются на природу умножением на масштабный коэффициент 11,5.

Обзор выполненных работ

Работы по модельным исследованиям размыва грунта около опорных оснований морских технических сооружений ведутся во ФГУП «Крыловский государственный научный центр» с 2000 г. Их перечень представлен в табл. 3.

Во ФГУП «Крыловский государственный научный центр» также ведутся работы по численному моделированию процессов размыва грунта у морских инженерных сооружений [14].



Таблица 3
Перечень выполненных работ

№ п/п	Наименование работы	Объект исследования. Заказчик.	Год
1	Экспериментальные исследования размыва грунта и поведения танкера при работе главных движителей в процессе погрузки у МЛСП в условиях мелкой воды и волнения.	МЛСП “Приразломная” ЗАО “Росшельф”	2000
2	Разработка рекомендаций по безопасной эксплуатации буровой платформы на базе кранового судна «Исполин» на основе комплексных расчетно-экспериментальных исследований ее взаимодействия с грунтовым основанием с учетом воздействия волнения.	“Исполин” ОАО “ЦКБ “Коралл”	2003
3	Исследование местных размывов грунта морского дна вокруг понтонов ледостойкой стационарной платформы (ЛСП) на базе БПНК «Шельф-7» на основе модельных испытаний в мелководном опытовом бассейне	ЛСП “Шельф-7” ОАО “ЦКБ Коралл”	2005
4	Экспериментальное определение параметров размыва и отложений грунта у МЛСП под воздействием работающих винтов швартующихся у платформы судов	МЛСП “Приразломная” ОАО “Газпром”	2005
5	Комплексные расчетно-экспериментальные исследования плавучей буровой установки «Обский-1» в волновом бассейне, включая его взаимодействие с грунтовым основанием и учетом внешних воздействий (волнения и течения).	ППБУ “Обская” ОАО “Газпром”	2007
6	Экспериментальная проверка в опытовом бассейне эффективности предложенных технических решений по защите грунтового основания под ППБУ “Обская” от размыва, вызванного внешними воздействиями (волнение и течение)	ППБУ “Обская” ООО “Газфлот”	2008
7	Определение зон и глубины размывов грунта вокруг опорных блоков и под опорными блоками платформы ЦТП на основе модельных испытаний в мелководном опытовом бассейне	ЦТП для месторождения им. Филановского. ОАО «Лукойл»	2010
8	Модельные исследования размыва грунта около опорного основания и защитного кессона мобильной ледостойкой буровой установки (МЛБУ).	МЛБУ ЦКБМТ «Рубин»	2011
9	Модельные исследования размыва грунта около модернизированного ПБК «Обский-1» в результате воздействия волнения и течения.	ПБК «Обский-1». ООО «Газфлот»	2011



Заключение

Подводя итог, хочется отметить следующее:

1. Доработка оборудования мелководного опытового бассейна, выполненная силами его обслуживающего персонала, позволила успешно проводить эксперименты в новой для ФГУП «Крыловский государственный научный центр» области.

2. Применение в качестве модельного грунта мелкозернистого песка позволило проводить модельные исследования и интерпретировать их результаты на натуре применительно к донным грунтам различных типов и различного строения.

3. Применение современной аппаратуры для измерения рельефа поверхности и её оцифровки позволяет существенно повысить точность выполняемых измерений, улучшить наглядность представления результатов, снизить трудоёмкость выполнения работ.

4. Успешный опыт выполнения работ в представленной области позволяет ФГУП «Крыловский государственный научный центр» и в дальнейшем предлагать заказчикам выполнение исследований по размыву грунта около опорных оснований морских технических сооружений в результате воздействия волнения, течения и струй от движителей швартуемых к ним судов.

5. Для повышения качества выполняемых работ необходима дальнейшая модернизация применяемого экспериментального оборудования в части разработки специализированной системы для создания течения в бассейне, расширения возможностей волнопродуктора в части создания нерегулярного волнения, совершенствования измерительного оборудования.

Литература

1. Дэвис М. Х., Мищенко С. М. Экспериментальные исследования местных размывов дна у основания морских гидротехнических сооружений. Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, т. 236, 2000.
2. Мищенко С. М. Местные размывы дна у основания ледостойкой платформы. Научно-технические ведомости СПбГТУ, № 2(4), СПб. 1996. С. 93–100.
3. Mishchenko S.M. Local Seabed Erosion at the Foundation of the Ice Resistance Platform. 2 International Conference - Development of Russian Arctic Offshore. 1995, St.-Petersburg
4. Mishchenko, S. (1998). Analysis of Wave and Current Induced Scour Around the Molikpaq and Spacer. Appendix F to CHC Technical Report CTR-HYD-053 Sakhalin Rock Armor Optimization Model Study - Testing Summary and Scale Effects by M.Davies, I. Reid and A. Barker, National Research Council, Ottawa, Canada.



5. *Лятхер В.М., Прудовский А.М.* Гидравлическое моделирование. Москва, Энергоатомиздат, 1984.
6. *Векслер А. Б.* Определение масштабных коэффициентов при моделировании несвязного грунта, взаимодействующего с водным потоком. Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, т. 208, 1988.
7. *Журавлев М. М.* Местный размыв дна у опор мостов. М.: Транспорт. 1984.
8. *Халфин И. Ш.* Воздействие волн на морские нефтегазопромысловые сооружения. М.: Недра. 1990.
9. *Fredsoe J., Sumer B.M., Amskov M.M.* Time Scale for Wave/Current Scour Below Pipelines. Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering (ISVA), Technical University of Denmark, Lyngby.
10. *Sumer, B.M. and J. Fredsoe,* 2002. The Mechanics of Scour in the Marine Environment. World Scientific, Singapore, 536 p.
11. Pier and Contraction Scour in Cohesive Soils. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board Executive Committee Subcommittee for NCHRP
12. Evaluating Scour at Bridges. Report No. FHWA NHI 01-001. HEC-18./ 2005.
13. Bridge scour in nonuniform sediment mixtures and in cohesive materials: Synthesis report. Report No. FHWA-RD-03-083/ 2003.
14. *Лобачев М.П., Пустошный А.В., Сазонов К.Е., Чичерин И.А.* Численное моделирование взаимодействия струи от винта с грунтом. Фундаментальная и прикладная гидрофизика, № 1, 2008.