

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

Л.Г. Щемелинин
начальник сектора¹
54lab@krylov.sp.ru

В.И. Денисов
зам. начальника лаборатории¹

К.Е. Сазонов
д.т.н., начальник лаборатории¹

¹ ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова»,
Санкт-Петербург, Россия

Для освоения месторождений углеводородного сырья, расположенных в мелководной части прибрежного шельфа, широко применяются буровые платформы гравитационного типа. Опорные основания таких платформ устанавливаются непосредственно на морское дно. В процессе эксплуатации платформы донный грунт около её опорного основания и под ним подвергается внешним воздействиям со стороны морского течения и волнения, а также от струй движителей швартующихся судов. В результате происходит размыв грунтового основания с потерей площади опорной поверхности, что может привести к потере устойчивости платформы на грунте. Работы по исследованию процесса размыва грунта около опорных оснований морских буровых платформ гравитационного типа посредством проведения модельных испытаний выполняются в мелководном опытовом бассейне ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова» с 2000 г.

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.

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 в ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова».

В 2000 году в ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова» была проведена модернизация мелководного опытового бассейна для проведения исследований по размыву грунта. Для выполнения указанных исследований мелководный 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 участок дна морской акватории с установленной на нем моделью сооружения. 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 18,35×9,0 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.

Разработанные экспериментальные технологии позволяют изучать воздействие на грунт таких факторов, как: волнение, течение, работа движителей пришвартованных к сооружению судов. Регулярное волнение создается 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 модельных экспериментах течение имитируется с помощью расположенного

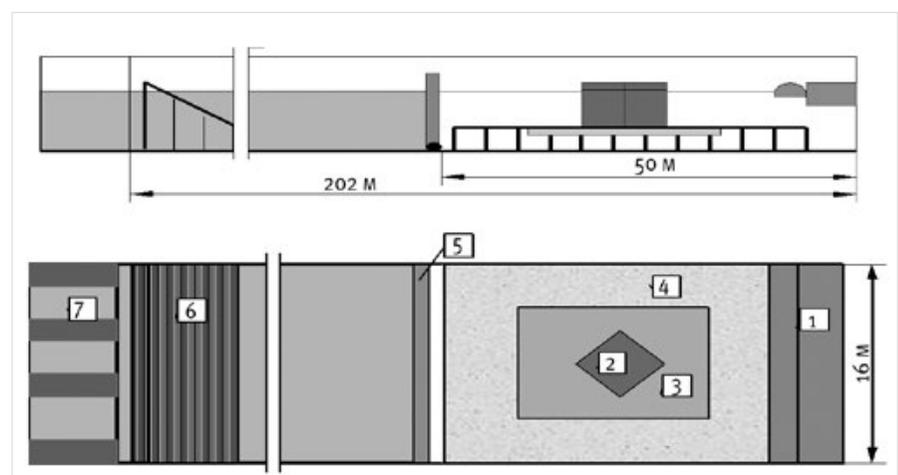


Рис. 1 — Схема мелководного опытового бассейна с площадкой для моделирования морского дна: 1. Волнопродуктор; 2. Модель платформы; 3. Модель грунтового основания; 4. Второе дно; 5. Опускаемый затвор; 6. Волногаситель; 7. Доковая часть бассейна

в бассейне сужающегося канала. Широкий конец этого канала направлен в сторону волнопродуктора, а в его противоположном, узком, конце располагаются два импеллера диаметром 240 мм каждый, поставленные на специальные рамы-подставки. Работаящие импеллеры «отсасывают» воду из канала, создавая течение над песком. Регулируя их частоту вращения можно регулировать и скорость течения в канале. При этом создаваемые волнопродуктором волны входят в канал с его широкой стороны и также оказывают воздействие на песок. Для гашения отраженных волн, возникающих при взаимодействии волнения с каналом, между импеллерами расположен реечный волногаситель. Схема установки представлена на рис. 2, а её фотография на рис. 3.

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.

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

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

где: $U_b(x, y)$ — придонная скорость потока в рассматриваемой точке, $U_{кр}$ — 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 шероховатости 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 потока 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 $\frac{U}{U_*} = idem$ или $\frac{v}{w} = idem$, где U — характерная скорость течения, w — гидравлическая крупность частиц грунта, $U_{кр}$ — 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

Поскольку этот бассейн изначально не предназначался для проведения таких экспериментов, в дополнение к его оборудованию были созданы специальные экспериментальные средства. Также были разработаны и опробованы технологии проведения модельных экспериментов по исследованию размыва грунта около установленных на нём объектов. Настоящая статья знакомит с использованием для проведения модельных экспериментов оборудованием и технологией их проведения.

Материалы и методы

Физическое моделирование в гидродинамическом опытовом бассейне.

Ключевые слова

морские буровые платформы, размыв грунта, модельный эксперимент

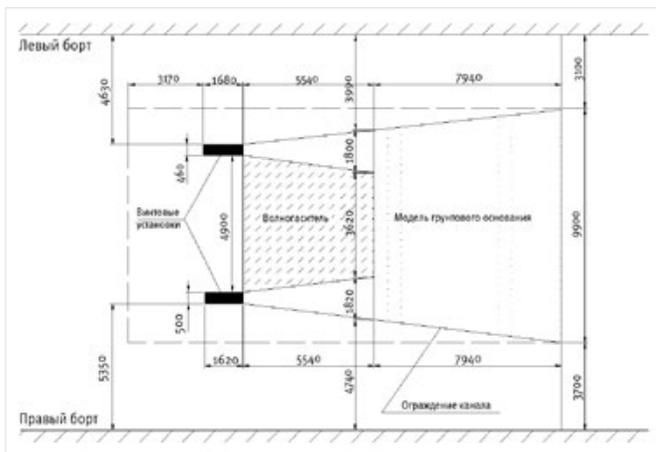


Рис. 2 — Схема установки для создания течения



Рис. 3 — Внешний вид установки для создания течения

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 подготавливается из соображений, чтобы его размывающая скорость была по возможности наименьшей. Тогда, форсируя скорость течения воды в модельных условиях, можно приблизиться к условиям автомодельности по критерию начала страгивания грунта. На основании этих требований для проведения исследований в ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова» был использован песок марки $ЗК_3O_3O_2$ по ГОСТу 2138-91. Основные характеристики песка представлены в таб. 1.

На основании этой таблицы средний диаметр песка $d_{cp} = 0,222$ 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 автомодельности;
- обеспечения длительности воздействия течения и волнения, эквивалентного при пересчете на натуре 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].

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.

Специалистами ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова» была разработана уникальная гидроакустическая система отображения рельефа дна, позволяющую проводить измерения на сверх малых 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 акустического 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

Гранулометрический состав в %

Марка песка ГОСТ 2138-91	Глинистая сост.	2.50	1.60	1.00	0.63	0.40	0.315	0.20	0.16	0.10	0.063	0.05
ЗК3O3O2	0.72	—	—	0.02	0.74	10.84	17.00	44.56	12.16	10.90	2.46	0.16

Таб. 1 — Основные характеристики применяемого при моделировании песка

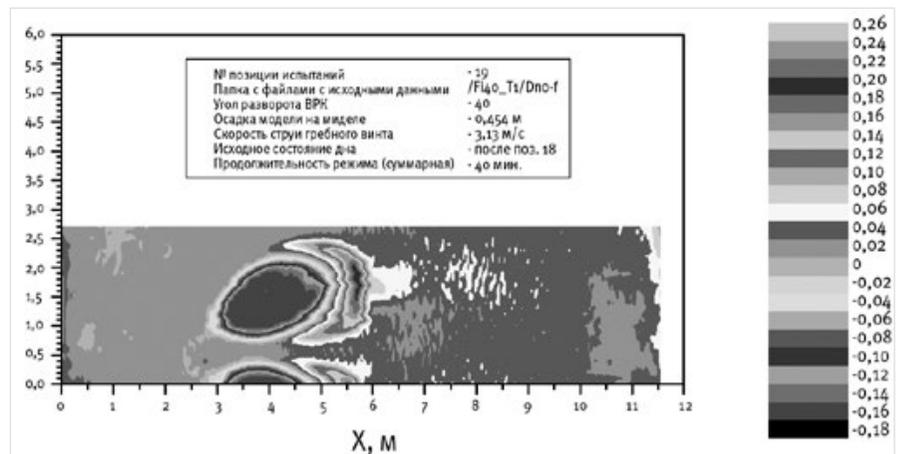


Рис. 4 — Трехмерная картина размыва участка дна после воздействия на него струй от работающих гребных винтов модели судна



Рис. 5 — Фотография участка дна после воздействия на него струй от работающих гребных винтов модели судна

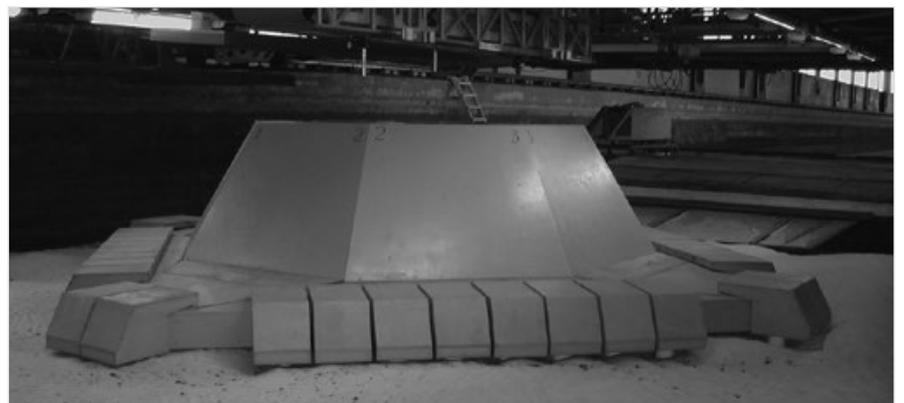


Рис. 6 — Фотография модели защитного кессона морской ледостойкой буровой установки (МЛБУ) в процессе испытаний (вода слита)

поперечной координате и буксировочная тележка совершает следующий проход.

Все полученные на каждой траектории движения акустического датчика профили с помощью компьютерной программы формировали структуру графического представления донной поверхности. Для начальной фиксации точки отсчета всех траекторий на дне вблизи поверхности размыва был установлен металлический швеллер. По полученным профилограммам, с соблюдением масштаба по трем координатам, строится трехмерная диаграмма поверхности дна, представленная на рис. 4. На рис. 5 приведена фотография этого же 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, измерения параметров размыва грунта в непосредственной близости от опорного основания и под ним проводится 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 «ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова» используется оптическая измерительная система фирмы GOM mbH (Германия).

Ниже приводятся результаты применения оптической системы при исследовании размыва, в результате воздействия волнения и течения, грунта у варианта защитного кессона морской ледостойкой буровой установки (МЛБУ), фотография модели которой в процессе испытаний приведена на рис. 6.

На рис. 7 представлено полученное в результате измерений, выполненных с помощью оптической измерительной системы,

изображение поверхности песчаного дна около модели защитного кессона МЛБУ до её удаления, а на рис. 8 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 фирмы GOM mbH, были получены 3D диаграммы, иллюстрирующие рельеф поверхности песчаного дна. Пример такой диаграммы приведён на рис. 9.

Полученные в модельных экспериментах данные пересчитываются на натурные условия в соответствии с требованиями теории подобия.

Итоги

Основной целью разработки технологии модельных исследований размыва грунта около опорных оснований морских технических сооружений в результате воздействия внешних факторов является обеспечение их безопасной эксплуатации в части устойчивости на донном грунте на протяжении всего срока работы такого сооружения в данной точке. Для достижения указанной цели предложены и апробированы методы решения задач по оценке возможной потери площади опорной поверхности в результате размыва грунта под опорным основанием сооружения, а также для разработки средств защиты грунта от размыва

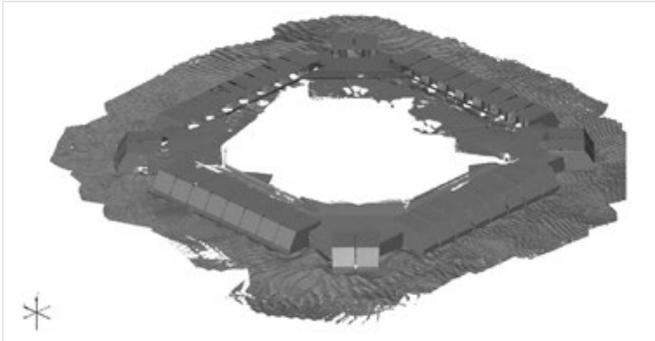


Рис. 7 — Поверхность песчаного дна около модели защитного кессона МЛБУ (до её удаления), полученная с помощью оптической измерительной системы

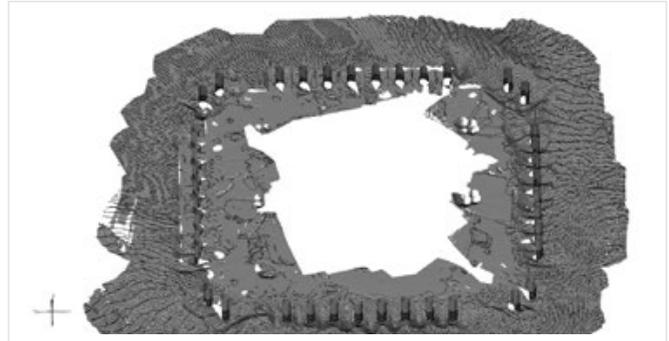


Рис. 8 — Поверхность песчаного дна после удаления модели защитного кессона МЛБУ, полученная с помощью оптической измерительной системы

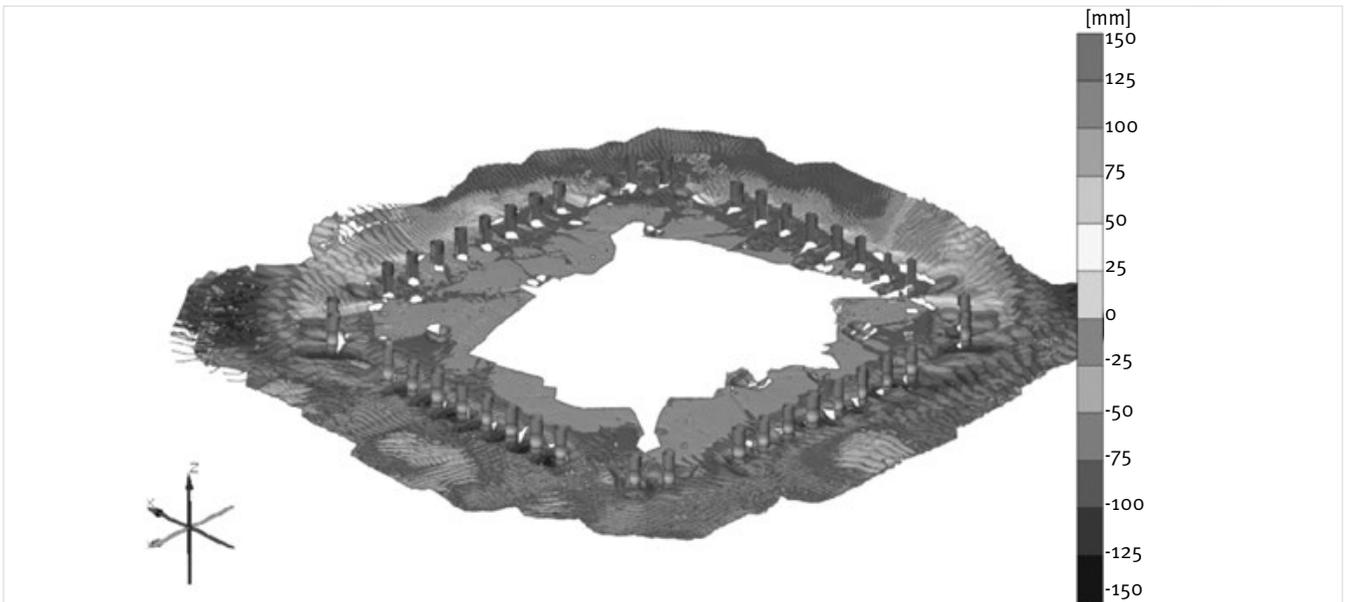


Рис. 9 — Пример 3D диаграммы, иллюстрирующей рельеф поверхности песчаного дна около модели защитного кессона МЛБУ и под ней

и получения оценки их эффективности и устойчивости к внешним воздействиям.

Выводы

Успешный опыт выполнения работ в соответствии с описанным выше технологией явился основой для дальнейшего развития в ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова» исследований по размыву грунта около опорных оснований морских технических сооружений в результате воздействия волнения, течения и струй от движителей швартующихся к ним судов.

Список использованной литературы

1. Дэвис М.Х., Мищенко С.М.

Экспериментальные исследования местных размывов дна у основания морских гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ им. Веденеева Б.Е. 2000. т. 236. С. 140–151.

2. Мищенко С.М. Местные размывы дна у основания ледостойкой платформы. СПб.: Научно-технические ведомости СПбГТУ, 1996. № 2(4). С. 93–100.

3. Mischenko S.M. Local seabed erosion at the foundation of the ice resistant platform. — Transactions. Second International Conference RAO'95, St. Petersburg.

4. Mischenko S. 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 Davies M., Reid I., Barker A., National Research Council, Ottawa, Canada. 1998.

5. Лятчер 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. Веденеева Б.Е. 1988. т. 208. С. 40–43.

ENGLISH

INDUSTRIAL SAFETY

Modeling technique for research a washout of soil at offshore structures basic basis

UDC 629.563.23:551.462.32 (26.03)

Authors:

Leonid G. Shchemelinin — head of a section¹; 54lab@krylov.sp.ru

Valeriy I. Denisov — deputy head of a laboratory¹

Kirill E. Sazonov — professor, head of a laboratory¹

¹Krylov Shipbuilding Research Institute (KSRI), Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract

For development of deposits of the hydrocarbonic raw materials located in a shallow part of a coastal shelf, offshore structures of gravitational type are widely applied. The basic bases of such structures are established directly on a sea-bottom. While in service offshore structure the sea-bottom soil near its basic basis and under it is exposed to external influences from a sea current, waves and also from propellers streams of ships, approaching to the structure. As a result there is a washout of the soil basis to loss of the area of a basic surface that can lead to loss of stability of the structure on sea-bottom. Works on research of process of soil erosion near the basic bases of gravitational type offshore structures by means of carrying out of modeling tests are carried out in shallow water towing tank of KSRI since 2000. As this towing tank initially didn't intend for carrying out of such experiments, in addition to its equipment 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 article acquaints with the equipment used for carrying out of the modeling experiment and techniques of their carrying out.

Materials and methods

Physical modeling in hydrodynamic basin.

Results

Main objective of modeling researches technology of soil washout at offshore structures foundation as a result of influence of external factors development is ensuring their safe operation regarding stability on ground soil throughout all term of work of such structures in this point. For this purpose achievement the tasks solution methods of an assessment of possible basic surface area loss as a result of soil washout under an offshore structure

foundation, and also for soil protection means development and receiving an assessment of their efficiency and stability to external influences are offered and approved. Successful experience of works according to the technology described above was a basis for further development in KSRI of researches on soil washout at offshore structures foundations as a result of impact of sea waves, a current and propeller streams of being moored to them ships.

Conclusions

Successful experience of works according to the technology described above was a basis for further development in KSRI of researches on soil washout at offshore structures foundation as a result of impact of sea waves, a current and propeller streams of being moored to them ships.

Keywords

offshore structures, a washout of the soil, modeling experiments

References

1. Devis M.H., Mishchenko S.M. *Ekspierimental'nye issledovaniya mestnykh razmyvov dna u osnovaniya morskikh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Experimental Research of Local Seabed Erosion at Foundations of Offshore Hydro Technical Structures]. *Izvestiya VNIIG im. Vedeneeva B.E.*, 2000, vol. 236, pp. 140–151.
2. Mishchenko S.M. *Mestnye razmyvy dna u osnovaniya ledostoykoy platformy* [Local Seabed Erosion at the Foundation of the Ice Resistance Platform]. Saint Petersburg: *Nauchno-Tekhnicheskie*

Vedomosty STU, 1996, issue 2(4), pp. 93–100.

3. Mischenko S.M. Local seabed erosion at the foundation of the ice resistant platform. — Transactions. Second International Conference RAO'95, Saint Petersburg
4. Mischenko S. 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 Davies

M., Reid I., Barker A., National Research Council, Ottawa, Canada. 1998.

5. Liatcher V.M., Prudovsky A.M. *Gidravlichesкое моделирование* [Hydraulic Modeling]. Moscow: *Energoatomizdat*, 1984.
6. Veksler A.B. *Opreделение masshtabnykh koeffitsientov pri modelirovanii nesvyaznogo grunta, vzaimodeystvuyushchego s vodnym potokom* [Determination of scale coefficients at modeling of soil — water stream interaction]. *Izvestiya VNIIG im. Vedeneeva B.E.*, 1998, vol. 208, pp. 40–43.