

УДК 551.466.62 + 627.231
EDN JPLZYT

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЛН ЦУНАМИ НА ПЛАВУЧИЙ ОБЪЕКТ С ЯКОРНОЙ СИСТЕМОЙ РАСКРЕПЛЕНИЯ

Н.Д. Беляев, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: belyaev_nd@spbstu.ru

В.В. Лебедев, канд. техн. наук, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: vladimir.v.lebedev@mail.ru

И.С. Нуднер, д-р техн. наук, профессор, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005 Россия, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1, e-mail: igor_nudner@mail.ru

К.К. Семенов, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: semenov.k.k@gmail.com

В статье рассматриваются особенности методики проведения экспериментов по физическому моделированию процесса воздействия длинных волн типа цунами на плавучий объект и анализируются их результаты. При интенсификации транспортировки сжиженного природного газа в страны Азии плавучие заякоренные хранилища будут размещены в бухтах Северного морского пути. Указанный транспортный коридор может подвергаться воздействию волн цунами. Решение задач, связанных с обеспечением безопасной эксплуатации морских объектов при действии различных видов внешних нагрузок в месте их базирования, является весьма актуальным и имеет практическую значимость. В работе были рассмотрены особенности моделирования процесса воздействия волн цунами на гидротехнические объекты и представлено подробное описание экспериментальной установки с анализом ее особенностей. Основное внимание уделено методике проведения экспериментальных работ с использованием датчиков и информационной системы для проведения измерения различных величин. Анализ результатов экспериментов указывает не только на необходимость измерения усилий в связях системы удержания, но и на обязательность определения перемещений плавучего объекта при воздействии на него волн цунами. Сделаны выводы о перспективности использования ультразвуковых датчиков, а также о необходимости учитывать отражения волн от стенок бассейна и проводить мероприятия по устранению или снижению воздействий отраженных от стенок волн на исследуемый объект.

Ключевые слова: волна цунами, моделирование, экспериментальная установка, датчики, плавучее хранилище газа.

Для цитирования: Беляев Н.Д. Особенности проведения экспериментальных исследований воздействия волн цунами на плавучий объект с якорной системой раскрепления / Н.Д. Беляев, В.В. Лебедев, И.С. Нуднер, К.К. Семенов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 87 — 95. — EDN JPLZYT.

FEATURES OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE TSUNAMI WAVES IMPACT ON A FLOATING OBJECT WITH AN ANCHOR SYSTEM

N.D. Belyaev, PhD, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251 Russia, St. Petersburg, Politekhnikeskaya ul., 29, e-mail: belyaev_nd@spbstu.ru

V.V. Lebedev, PhD, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251 Russia, St. Petersburg, Politekhnikeskaya ul., 29, e-mail: vladimir.v.lebedev@mail.ru

I.S. Nudner, DSc, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», 190005 Russia, St. Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya ul., 1, e-mail: igor_nudner@mail.ru

K.K. Semenov, PhD, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251 Russia, St. Petersburg, Politekhnikeskaya ul., 29, e-mail: semenov.k.k@gmail.com

The article examines the features of the methodology for conducting experiments on physical modeling of the process of long tsunami-type waves impact on a floating object and analyzes their results. It is assumed that when transporting liquefied natural gas to Asian countries, such storage facilities will be located in the bays of the Pacific Ocean. The specified transport corridor may be exposed to tsunami waves. Solving problems related to ensuring the safe operation of offshore facilities under the action of various types of external loads at their location is highly relevant and has practical significance. The paper examines the features of modeling the tsunami wave impact on hydraulic structures and presents a detailed description of the experimental setup with an analysis of its features. The main attention is paid to the methodology of conducting experimental works using sensors and an information system for measuring various quantities. Analysis of the experimental results indicates not only the need to measure the forces in the connections of the anchor system, but also the necessity of determining the movements of the floating object when it is exposed to a tsunami wave. Conclusions are drawn about the prospects of using ultrasonic sensors, as well as the need to consider the reflection of waves from the basin walls and take measures to eliminate or reduce the effects of waves reflected from the walls on the object under study.

Key words: tsunami wave, physical modeling, experimental setup, sensors, floating gas storage.

For citation: Belyaev N.D., Lebedev V.V., Nudner I.S., Semenov K.K. Features of experimental research of the tsunami waves impact on a floating object with an anchor system. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 87 — 95. EDN NUQPCY.

ВВЕДЕНИЕ

Оживление движения морских судов вдоль Тихоокеанского побережья РФ в связи с освоением Северного морского пути требует создания вдоль побережья транспортно-логистической базы, отвечающей современным требованиям [1]. В процессе создания такой базы возможно использование объектов различного назначения. Одной из важнейших задач является решение вопросов обеспечения безопасной эксплуатации объектов различной конструкции в условиях возможного волнения, в том числе экстремального, в точках размещения этих объектов в пределах рассматриваемой береговой зоны. При этом если для ветрового волнения задача обеспечения допустимого волнового режима решается однозначно с помощью создания оградительных сооружений или размещения объекта в защищенной бухте, то при воздействии волн цунами этого может быть не достаточно для обеспечения безопасной эксплуатации плавучих объектов.

Обычно при создании различных морских объектов предусматриваются оградительные сооружения, защищающие акваторию от ветрового волнения. Если же предполагается установка сооружения в месте, где возможно формирование волн цунами, то обязательной является оценка именно их воздействия на такой объект [2]. В последние годы такая оценка обычно проводится с использованием экспериментального метода [3 — 6], который позволяет определить усилия в связях системы удержания и перемещения плавучего объекта, вызванные действием волны цунами определенного профиля. Экспериментальные исследования, проведенные авторами ранее, показали, что при обтекании волной цунами на объект действуют знакопеременные нагрузки [7]. Усилия в якорных связях при таком воздействии имеют различные значения [8]. Система удержания якорными связями позволяет плавучему объекту осуществлять определенные перемещения в виде крена, рыскания и тангажа при любой его ориентации относительно луча волны цунами.

В статье излагаются методика и результаты экспериментальных исследований конкретного объекта в составе реализуемого проекта [9]. В экспериментах с воздействием на объект волны цунами определенного профиля необходимо было решить следующую задачу: определить усилия в якорных связях и перемещения объекта с заданным водоизмещением, который удерживался на глубине d системой раскрепления. Рассматривались два случая: с неподвижно зафиксированными якорями и с возможностью их допустимого перемещения при действии волны цунами экстремальных значений. Далее, помимо прочего, решались вопросы, возникающие в случае неподвижного размещения якорей: как будут изменяться усилия в связях системы раскрепления и перемещения объекта при воздействии волны цунами с экстремальными параметрами и возможным обрывом одной или нескольких связей?

Усилия в связях системы удержания являются реакцией на нагрузку, вызванную действием волны цунами, обтекающей плавучий объект, и их значения зависят от формы, размеров и диапазона изменений осадки T этого объекта. Кроме того, усилия в связях зависят от принятой системы удержания и от того, как размещены якоря относительно поверхности дна. В наибольшей степени значения усилий в связях зависят от параметров волны цунами, воздействующей на плавучий объект, в том числе от ее высоты и длительности действия, а также от глубины моря d в точке установки объекта. Таким образом, большое число параметров, влияющих на значения искомых величин, свидетельствуют о необходимости обширных экспериментальных исследований с целью получения достоверных данных для проектирования объекта. Здесь следует заметить, что экономические затраты на проведение таких исследований составляют незначительную часть от стоимости создания рассматриваемого объекта в случае наличия соответствующей экспериментальной базы. Полученные результаты экспериментальных исследований в значительной мере обеспечат принятие наиболее рационального решения по безаварийной эксплуатации объекта в течение нормативного срока. Также, если расширить значения воздействий за пределы нормативного срока, можно оценить, а может быть, и снизить путем разработки определенных мероприятий значения ущерба от аварийной ситуации, которая является следствием действия запредельных нагрузок.

Основой экспериментального метода проведения исследований является физическое моделирование как гидротехнических объектов, так и воздействующих на них нагрузок. Воздействие волн цунами на различные объекты является событием малой вероятности, и поэтому достоверные сведения о трансформации волны цунами в пределах береговой зоны в конкретной точке размещения сооружения чаще всего отсутствуют.

Соответственно, исходные данные для проведения экспериментальных исследований при необходимости учета воздействия волны цунами на натурный объект (профиль волны, ее длительность) получают используя расчетные методы [10, 11].

Так как движение обусловленных волнами цунами водных потоков в натуральных условиях и на модели может быть описано уравнениями Навье — Стокса, то для их подобия, согласно принципам физического моделирования, необходимо соблюдение равенства в сходственных точках в натуре и на модели критериев Фруда $Fr = V^2/gl$ и Струхала $Sh = Vt/l$, где V — скорость воды в сходственных точках, t — время, l — характерный линейный размер, g — ускорение силы тяжести.

Экспериментальные исследования необходимо проводить в автомодельной области чисел Рейнольдса $Re = Vl/\nu$, где ν — кинематический коэффициент вязкости жидкости. При моделировании волнового движения воды достоверные результаты могут быть получены при выполнении условия превышения критического значения чисел Рейнольдса $Re \geq Re_{кр}$, где $Re_{кр} = 1,0 \cdot 10^5$ [12, 13]. В этом случае в качестве характерного линейного размера при вычислении критериев подобия принимается глубина моря в месте установки плавучего объекта d . При определении критериев подобия максимальная орбитальная скорость поверхностной жидкой частицы принимается в качестве характерной. Ее можно определить по формуле:

$$V = h \sqrt{\frac{\pi g \operatorname{cth}(2\pi d/\lambda)}{2\lambda}},$$

где h — высота;
 λ — длина набегающей волны.

После того как с учетом соответствия условиям автомодельности по числам Рейнольдса выбран минимально возможный масштаб моделирования, анализируются возможности экспериментальной базы.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Эксперименты по физическому моделированию воздействия волны цунами на плавучий объект проводились в бассейне, который был заполнен водой до определенной отметки, соответствующей заданной глубине установки модели. Экспериментальную установку можно условно разделить на три участка: головной, рабочий и концевой.

В головном участке были установлены волнопродукторы, предназначенные для создания волн типа цунами. В данном случае пневмоволнопродукторы, в состав которых входят резервуары, заполняемые водой до определенного объема путем создания вакуума (рис. 1).

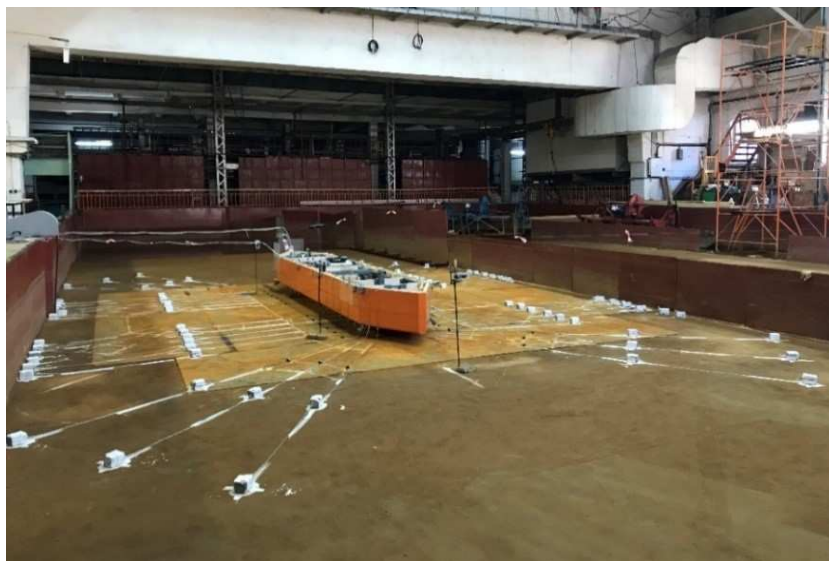


Рис. 1. Вид на головной и рабочий участки бассейна:
на заднем плане видны волнопродукторы; на переднем плане — модель плавучего объекта

Для формирования на экспериментальной установке волн типа цунами с отличающимися параметрами осуществляется выпуск соответствующих объемов воды с определенными скоростями. Это достигается срывом вакуума из резервуаров волнопродукторов. При движении в головном участке волна достигает требуемых параметров, которые контролируются волномером и датчиком скорости, расположенными в измерительном створе в начале рабочего участка (рис. 2).

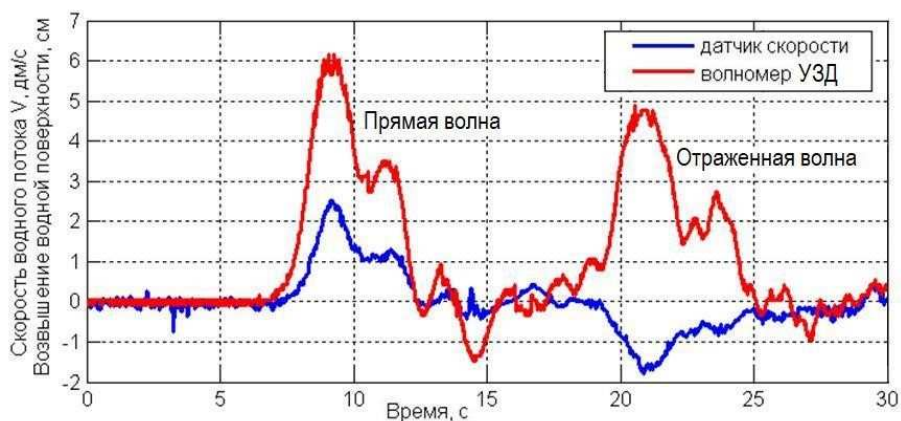


Рис. 2. Изменения профиля волны и поверхностной скорости водного потока в измерительном створе

Результаты, представленные на рис. 2, были получены с использованием ультразвукового датчика (УЗД) с бесконтактным принципом действия. Датчик играл роль волномера, выполняя измерения значений текущего отклонения уровня воды от отметки воды в спокойном состоянии. Определение значений скорости в поверхностном слое водного потока, образованного смоделированной волной типа цунами, осуществлялось датчиком скоростей (ДС) Nortek Vectrino, установленным в том же створе. Измеритель, используя эффект Доплера, контролировал изменения трех компонент скорости.

Определение изменения скорости необходимо при оценке возможности использования конкретного масштаба модели. Ранее эту существенную для обоснования правильности физического моделирования кинематическую характеристику определяли исключительно расчетными методами. Полученные экспериментальные значения скорости дают возможность подтвердить, что исследования проводятся в автомодельной области по числам Рейнольдса.



Рис. 3. Размещение модели плавучего объекта на рабочем участке экспериментальной установки

После створа, в котором установлены датчики УЗД и ДС, начинается рабочий участок с моделью плавучего объекта (рис. 3). В результате воздействия волны цунами в якорных связях, которые удерживают плавучий объект, возникают определенные растягивающие усилия, а сама модель плавучего объекта совершает сложные перемещения. Следует иметь в виду, что экспериментальная установка ограничена стенками бассейна, поэтому первая (прямая) волна после воздействия на плавучий объект перемещается далее по экспериментальной установке и отражается от задней стенки бассейна. Через некоторый промежуток времени отраженная волна воздействует на плавучий объект. Здесь следует учитывать, что профиль отраженной волны и промежуток времени начала ее воздействия на плавучий объект для натурного объекта и модели будут различаться, даже если модельные значения пересчитать по правилам моделирования на натурные условия. Кроме того, из-за отсутствия экспериментальных и натурных данных по формированию процесса отражения волны цунами от берега не представляется возможным такую отраженную волну смоделировать. Вследствие этого достоверными считались и учитывались только данные по прямому действию волны на модель.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Усилия в связях системы удержания плавучего хранилища газа при действии на него волны типа цунами имеют различные значения [8], поэтому существует необходимость измерения усилий во всех якорных связях. При измерении этих усилий выявлена одна общая особенность: при действии волны цунами из-за рывка возникают усилия в связях, и их продолжительность не превышает время действия волны. Таким образом, рывки происходят непосредственно в процессе воздействия прямой волны на модель плавучего хранилища газа.

На рис. 4 в качестве примера представлены осциллограммы специальных датчиков усилий в связях системы удержания носовой и кормовой частей модели, совмещенные с показаниями датчиков уровня воды УЗД в створе на границе головного и рабочего участков. С целью дальнейшего анализа результатов указанные измерения, полученные с использованием различных средств, были синхронизированы информационной системой.

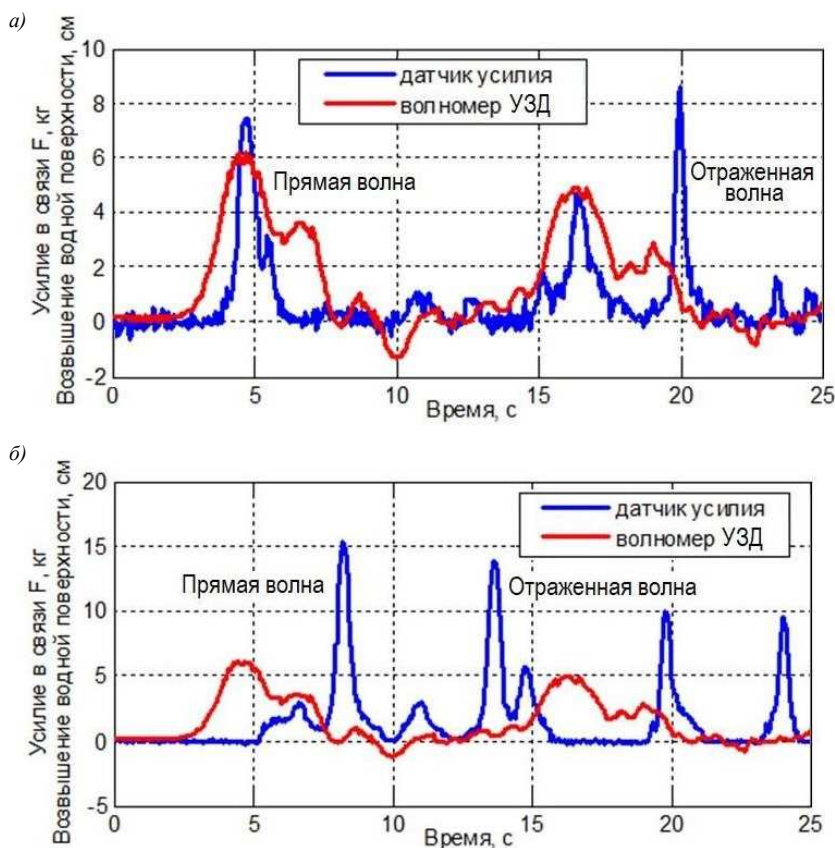


Рис. 4. Совмещенные осциллограммы датчиков уровня воды в створе на границе начального и рабочего участков и усилий в якорных связях в процессе воздействия волны цунами:

а — в носовой части плавучего объекта; б — в кормовой части плавучего объекта

Более подробно характер распределения усилий в связях системы удержания плавучего объекта и их анализ был представлен в статье [8].

Учитывая вышеизложенное, для получения достоверных данных по усилиям в связях концевой участок экспериментальной установки должен быть такой длины, чтобы отражение волны от задней стенки бассейна происходило тогда, когда воздействие прямой волны на плавучий объект завершено.

В связи с возможностью отражения волн, приходящих со стороны рабочего участка из-за ограниченных размеров бассейна, концевой участок экспериментальной установки предназначен для их трансформации и гашения. Вариантов уменьшения высот (гашения) до допустимых значений волн типа цунами, приходящих со стороны рабочего участка, в рассматриваемом случае существует немного. Первый вариант — это организация водослива на задней стенке бассейна с отметкой гребня, примерно совпадающей с отметкой воды в бассейне перед началом эксперимента. В этом случае при накате на водослив верхняя часть волны с наибольшей кинетической энергией переливается через него, и тем самым часть энергии волны рассеивается. Часть волны с меньшей энергией отражается от водослива и распространяется по экспериментальной установке. Высота отраженной волны контролируется волномером, расположенным на границе концевой и рабочего участков. Следует отметить, что чем меньше объем воды, используемый на экспериментальной установке, от общего объема бассейна, тем меньше значение падения уровня воды в бассейне при переливе воды через водослив во время эксперимента. Второй вариант — устройство в пределах концевой участка откоса с искусственной шероховатостью. В этом случае энергия волны при накате на откос расходуется на преодоление сил трения. Контроль параметров волны, формирующейся при откате с откоса, осуществляется волномером, расположенным на границе концевой и рабочего участков. В некоторых случаях возможна комбинация указанных вариантов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Иметь представление о том, как ведет себя плавучий объект под воздействием волны цунами, безусловно важно, в особенности когда используется схема с подвижными якорями или когда происходит обрыв якорной связи. Поэтому практическое и научное значение экспериментальных исследований, решающих указанные задачи, не подлежит сомнению. Проведение таких исследований имеет некоторые особенности. Во-первых, во время оттекания волной цунами плавучий объект перемещается в пространстве весьма сложным образом. Во-вторых, после окончания воздействия волны центр тяжести плавучего объекта может быть смещен. Поэтому для изучения перемещения плавучего объекта в пространстве можно принять следующую систему координат. Ноль в этой системе координат расположить в центре тяжести плавучего объекта. Ось X принять совпадающей с продольной осью плавучего объекта с увеличением по направлению распространения волны. Ось Z направить нормально вверх из центра тяжести объекта. Через центр тяжести объекта нормально плоскости XOZ направить ось Y . Тогда угол поворота ω_X объекта относительно оси X будет характеризовать его крен, угол поворота ω_Z относительно оси Z — его рыскание, а угол поворота ω_Y относительно оси Y — его тангаж.

Таким образом, определив перемещение и углы поворота объекта по трем направлениям во время воздействия на него волны цунами, можно знать его положение в пространстве. Положение объекта в пространстве в период воздействия волны цунами в любой момент времени можно определить, используя УЗД.

В качестве примера на рис. 5 показана схема расположения УЗД и экранов, отражающих ультразвуковые колебания. Такая схема была применена для определения перемещений плавучего объекта вдоль оси X и углов рыскания ω_Z . Для определения перемещений модели объекта вдоль оси X были использованы два УЗД, расположенные перед экранами в носовой и кормовой частях модели объекта. Для определения углов рыскания ω_Z также были использованы два УЗД, расположенные по одному борту плавучего объекта перед экранами на определенном расстоянии друг от друга. Ультразвуковые сигналы от указанных УЗД излучались в горизонтальной плоскости. На рис. 5 также видны УЗД, расположенные на границах рабочего участка с начальным и концевым и использованные в качестве волномеров. Ультразвуковые сигналы от этих УЗД излучались в вертикальной плоскости.

Пример перемещений вдоль оси X модели, расположенной так, как это показано на рис. 3, представлен на рис. 6 (профиль воздействующей в этом случае волны цунами см. на рис. 2). В данном случае для удержания объекта была применена схема с использованием подвижных якорей. Идея использования такой схемы (см. рис. 3) состоит в том, что, пока волна цунами не достигает определенной высоты, якоря системы удержания не смещаются. А при превышении волной цунами заранее установленных величин подвижки



Рис. 5. Модель плавучего объекта с экранами, отражающими ультразвуковые сигналы от УЗД, расположенными перед носовой и кормовой частями объекта, а также по его борту:
1 — отражающие экраны; 2 — УЗД для подачи сигналов в горизонтальной плоскости;
3 — УЗД для подачи сигналов в вертикальной плоскости

якорей системы удержания допустимы на некоторые расстояния. Соответственно, при расчете якорной системы можно использовать меньшие значения высот волн, что приводит к снижению расчетных усилий в цепях системы удержания и дает возможность применять цепи меньшего калибра. Действие волн цунами с большими высотами при этом не приведет к обрывам цепей за счет того, что плавучий объект будет иметь возможность смещаться при экстремальных воздействиях.

В течение относительно большей части времени действия на модель волны цунами (см. рис. 2) происходили ее колебания вдоль продольной оси X (рис. 6). Сначала объект смещался навстречу набегающей волне, далее в процессе затухающих с некоторым декрементом колебаний происходили подвижки уже по направлению воздействия.

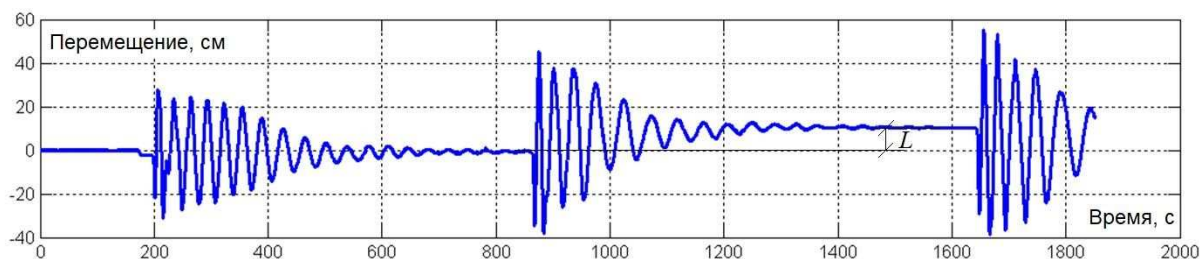


Рис. 6. Перемещения вдоль продольной оси модели плавучего объекта при воздействии на него волн цунами:
 L — смещение центра тяжести модели плавучего объекта в результате воздействия волны типа цунами

Изменение углов рыскания модели ω_z при действии волны цунами с определенным профилем и поверхностной скоростью (см. рис. 2) представлено на рис. 7. Полученные результаты показывают, что затухание углов рыскания происходит в течение относительно продолжительного периода.

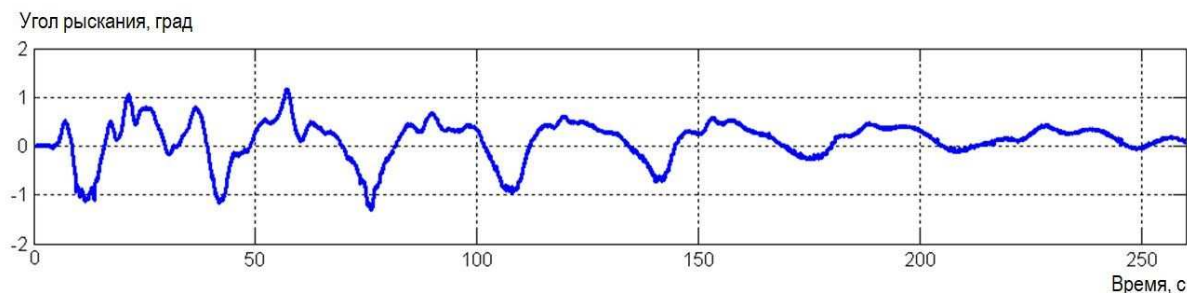


Рис. 7. Результаты определения угла рыскания ω_z модели при действии на нее волны цунами

Полученные результаты экспериментов (см. рис. 6 и 7) подтверждают важность определения не только усилий в якорных связях, но и перемещений объекта, подвергающегося воздействию волн цунами. Учет обоснованных представлений о перемещениях объекта по всем трем направлениям и об углах его поворота ω_Z , ω_Y , ω_X может повысить устойчивость и надежность сооружения. При этом решаются следующие вопросы:

- как и в какой момент будет смещаться сам плавучий объект, если система раскрепления допускает подвижку якорей?

- в какой момент произойдет разрыв связи системы удержания и что в ней будет после этого происходить при условии применения схемы с жесткими якорями?

Здесь следует отметить, что если появляется необходимость каким-либо образом повлиять на декремент затухания рассматриваемых колебаний, то возникает достаточно существенная проблема. Декремент затухания таких колебаний в первую очередь зависит от жидкости, окружающей плавучий объект. Так как при физическом моделировании в качестве жидкости используется вода, а эксперименты проводятся в автомодельной области по числам Рейнольдса, прямой пересчет результатов исследований, связанных с декрементом затухания, на натурные условия невозможен. Добавим, что для таких задач отсутствуют расчетные методы, основанные на математическом моделировании. Результаты экспериментальных исследований таких задач также почти отсутствуют, несмотря на существование практической необходимости их решения. Физическое моделирование процесса воздействия волн цунами на различные морские объекты должно осуществляться в автомодельной области по числам Рейнольдса, кроме того, при исследовании процессов затухания колебаний необходимо применять масштабный подход. Конечно, это весьма трудоемкий подход, но при недостаточной изученности рассматриваемого явления только он может обеспечить возможность пересчета на натуру результатов, полученных с помощью физического моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментальные исследования воздействия волн типа цунами на плавучие объекты должны состоять из двух этапов. Первый этап, подготовительный, заключается в подготовке согласно заданию профилей волн, которые должны воздействовать на модель плавучего объекта, на границе начального и рабочего участков. То есть в пределах этого этапа проводится тарировка волнопродуктора. Одновременно проверяется эффективность работы волногасящего устройства, размещенного на концевом участке, то есть определяется степень гашения волн, отразившихся от задней границы экспериментальной установки. После окончания работ подготовительного этапа, когда определены все параметры волн и скоростей водного потока на границе начального и рабочего участков, а также установлено, что отраженные от задней границы экспериментальной установки волны гасятся до допустимых значений, проводится второй, основной этап экспериментальных исследований. При проведении этого этапа на размещенную в пределах рабочего участка модель плавучего объекта с намеченной системой раскрепления осуществляется воздействие подобранных волн и производятся необходимые измерения усилий в якорных связях и перемещений модели плавучего объекта.

Экспериментальные исследования по определению усилий в якорных связях системы раскрепления и перемещений плавучих объектов в случае воздействия на них волн цунами требуются для принятия наиболее рациональных решений по размещению таких объектов в цунамиопасных районах. В настоящее время проведение таких исследований принципиально возможно при наличии соответствующей экспериментальной базы, оснащенной современными средствами измерений. При этом, как показывают результаты опытов, весьма перспективным является использование ультразвуковых датчиков, работающих в воздушном пространстве, для измерения расстояния от излучателя датчика до твердой или жидкой поверхности. Вследствие ограниченности опытовых бассейнов особенностью указанных экспериментальных исследований является необходимость учитывать отражение волн от стенок бассейна и принимать меры по устранению или снижению воздействий отраженных волн на исследуемый объект.

Описанные в статье методика и особенности проведения экспериментальных исследований воздействий волн типа цунами на плавучий заякоренный объект могут быть использованы и при опытах с другими гидротехническими сооружениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. План развития Северного морского пути на период до 2035 года. Утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 1 августа 2022 г. № 2115-р.
2. СП 292.1325800.2017. Здания и сооружения в цунамиопасных районах / Минстрой России. — М., 2017.
3. Беляев Н.Д. Экспериментальные исследования воздействия волн типа цунами на грунт у оснований морских гравитационных платформ / Н.Д. Беляев, В.В. Лебедев, И.С. Нуднер, А.В. Мишина и др. // Инженерно-строительный журнал. — 2014. — № 6 (50). — С. 4 — 12.
4. Гусаров Р.Н. Опыт и задачи физического моделирования волн цунами / Р.Н. Гусаров, И.Г. Кантаржи // ГеоРиск. — 2022. — Т. XVI, № 1. — С. 8 — 19. — DOI 10.25296/1997-8669-2022-16-1-8-19.
5. Гусаров Р.Н. Экспериментальные и аналитические исследования волн цунами, вызванных землетрясениями и оползнями / Р.Н. Гусаров, И.Г. Кантаржи // Гидротехническое строительство. — 2023. — № 10. — С. 48 — 56.
6. Кантаржи И.Г. Воздействие длинных волн на береговые гидротехнические сооружения / И.Г. Кантаржи, Н.А. Губина, Р.Н. Гусаров // Гидротехническое строительство. — 2021. — № 2. — С. 48 — 52.
7. Бабчик Д.В. Экспериментальная оценка нагрузок на плавучий объект от прямого воздействия волн цунами / Д.В. Бабчик, Н.Д. Беляев, В.В. Лебедев, И.С. Нуднер и др. // Гидротехническое строительство. — 2022. — № 8. — С. 15 — 21. — DOI 10.34831/EP.2022.99.38.002.
8. Беляев Н.Д. Экспериментальное определение усилий в якорных связях плавучего объекта при воздействии волн цунами / Н.Д. Беляев, В.В. Лебедев, И.С. Нуднер, К.К. Семенов и др. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70/71. — С. 128 — 142.
9. Беляев Н.Д. Необходимость использования экспериментального метода при изучении цунами / Н.Д. Беляев, В.В. Лебедев, И.С. Нуднер, К.К. Семенов и др. // Гидротехническое строительство. — 2024. — № 5. — С. 34 — 40.
10. Veldman A.E.P. Extreme wave impact on offshore platforms and coastal constructions / A.E.P. Veldman, R. Luppés, T. Bunnik, R.H.M. Huijsmans et al. // Proceedings of the International Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Rotterdam, The Netherlands, 2011. — P. 365 — 376. DOI 10.1115/OMAE2011-49488.
11. Gusev O.I. Numerical investigation of the wave force on a partially immersed rectangular structure: Long waves over a flat bottom / O.I. Gusev, G.S. Khakimzyanov, L.B. Chubarov // Ocean Engineering. — 2021. — Vol. 221. — P. 108540. — DOI 10.1016/j.oceaneng.2020.108540.
12. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений ветровых волн / И.И. Леви. — М., Л.: Госэнергоиздат, 1960. — 210 с.
13. Лаппо Д.Д. Условия автоматизации в исследованиях волнового движения жидкости / Д.Д. Лаппо, А.М. Жуковец, С.С. Мищенко // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева: сб. науч. тр. — 1979. — Т. 132. — С. 59 — 65.

REFERENCES

1. Plan razvitiya Severnogo morskogo puti na period do 2035 goda [Northern Sea Route development plan for the period up to 2035]. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated 1 August 2022 No. 2115-r.
2. SP 292.1325800.2017. Zdaniya i sooruzheniya v tsunamioопасnykh raionakh [Buildings and structures in tsunami-prone areas] / Ministry of Construction of Russia. — Moscow, 2017.
3. Belyaev N.D., Lebedev V.V., Nudner I.S., Mishina A.V. et. al. Experimental study of tsunami-type waves impact on soil at foundations of offshore gravity platforms. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. No. 6 (50). P. 4 — 12. (In Russ.)
4. Gusarov R.N., Kantargi I.G. Experience and tasks of physical modeling of tsunami waves. *GeoRisk World*. 2022. Vol. XVI, No. 1. P. 8 — 19. DOI 10.25296/1997-8669-2022-16-1-8-19.
5. Gusarov R.N., Kantargi I.G. Experimental and analytical studies of tsunami waves caused by earthquakes and landslides]. *Power Technology and Engineering*. 2024. Vol. 57, Issue 6. P. 887 — 895. DOI 10.1007/s10749-024-01753-7.
6. Kantargi I.G., Gubina N.A., Gusarov R.N., Effects of long waves on coastal hydraulic structures. *Power Technology and Engineering*. 2021. Vol. 55, Issue 2. P. 219 — 222. DOI 10.1007/s10749-021-01343-x.
7. Babchik D.V., Belyaev N.D., Lebedev V.V., Nudner I.S. et al. Experimental estimation of loads on a floating object exerted by the direct impact of tsunami waves. *Power Technology and Engineering*. 2023. Vol. 55, Issue 5. P. 666 — 671. DOI 10.1007/s10749-023-01571-3.
8. Belyaev N.D., Lebedev V.V., Nudner I.S., Semenov K.K. et al. Experimental determination of the forces in the anchor system of a floating object under the impact of tsunami waves. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 70/71. P. 128 — 142. (In Russ.)
9. Belyaev N.D., Lebedev V.V., Nudner I.S., Semenov K.K. et al. Necessity of Using an Experimental Method When Studying Tsunami. *Power Technology and Engineering*. 2025. Vol. 58, Issue 4. P. 580 — 585. DOI 10.1007/s10749-025-01851-0.
10. Veldman A.E.P. Extreme wave impact on offshore platforms and coastal constructions / A.E.P. Veldman, R. Luppés, T. Bunnik, R.H.M. Huijsmans et al. *Proceedings of the International Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Rotterdam, The Netherlands, 2011. P. 365 — 376. DOI 10.1115/OMAE2011-49488.
11. Gusev O.I., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B. Numerical investigation of the wave force on a partially immersed rectangular structure: Long waves over a flat bottom. *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 221. P. 108540. DOI 10.1016/j.oceaneng.2020.108540.
12. Levi I.I. Modelirovanie gidravlicheskih yavlenii vetrovykh voln [Modeling of hydraulic phenomena of wind waves]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. 210 p.
13. Lappo D.D., Zhukovets A.M., Mishchenko S.S. Usloviya avtomodel'nosti v issledovaniyakh volnovogo dvizheniya zhidkosti. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva* [Proceedings of the Vedenev VNIIG]. 1979. T. 132. P. 59 — 65.