

doi: 10.5862/MCE.48.6

Натурные измерения волнения при определении нагрузок на морские гидротехнические сооружения

*Д.т.н., проф. И.Г. Кантаржи,
Московский государственный строительный университет
к.ф.-м.н., научный сотрудник К.И. Кузнецов,
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН*

Аннотация. Согласно требованиям актуальных российских нормативных документов при определении волновых нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения необходимо использовать расчетные методы, а полученные результаты должны уточняться с помощью натурных измерений и лабораторных исследований. Однако такое требование на практике сталкивается с отсутствием данных натурных измерений для большинства площадок морского гидротехнического строительства.

Кроме того, использование метода эквивалентного расчетного волнения не позволяет сравнивать напрямую расчетные параметры волн с результатами измерений реальных штормов. Для реализации требований норм применяется метод реанализа гидрометеорологических условий для района строительства за период 30–50 лет и затем расчета опасных штормов за этот период.

Такой подход использовался для определения волновых полей в береговой зоне Имеретинской низменности в г. Сочи, для которого проектировался комплекс берегозащитных сооружений. Расчетные параметры волн сравнивались с имеющимися данными буйковых измерений в районе г. Геленджика и измерений, проведенных на береговой волноизмерительной станции в г. Сочи. Для выполнения натурных измерений волн целесообразно использовать придонные датчики давления, которые могут успешно использоваться в осложненных условиях. Для определения поверхностных волн по измерениям давления используются волновые теории.

Ключевые слова: волновые нагрузки на гидротехнические сооружения; уточнение расчетных характеристик; метод реанализа; Имеретинская низменность; придонные датчики давления

Введение

В настоящее время морская гидротехника в России активно развивается. Основные внешние нагрузки на морские гидротехнические сооружения определяются поверхностными волнами и ледовыми полями. Безопасность проектируемых сооружений в значительной степени зависит от корректного определения этих характеристик. При этом привлекаются и расчетные методы, и современные математические модели, а также проводятся натурные наблюдения и лабораторные исследования.

Основным нормативным документом, обеспечивающим определение расчетных параметров волн и льда, является СНиП 2.06.04-82* «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)», 1984 г. В соответствии со СНиПом используются материалы инженерно-гидрометеорологических изысканий, многолетние натурные наблюдения гидрометеорологических процессов в районе проектирования.

При этом для льда используются непосредственно наблюдения за характеристиками ледовых полей, а для волн применяются наблюдения за полями (скорости и направления) ветра. В связи с этим в состав СНиП 2.06.04-82* было включено «Приложение 1. Обязательное. Элементы волн на открытых и огражденных акваториях». В этом приложении рекомендованы методы расчета элементов волн на глубокой воде по полям ветра, а также волн у сооружения. Так как расчетный метод должен применяться для всего многообразия природных условий шельфа и береговой зоны морей, то были предложены некие осредненные подходы, что отмечалось авторами использованных методов [1, 2]. И хотя эти методы дополнены некоторыми эмпирическими поправками, они остаются осредненными и допускающими непредсказуемые погрешности при применении для конкретных условий района проектирования. Предполагается, что погрешности определения расчетных параметров волн и льда будут компенсированы инженерными запасами, принимаемыми при проектировании.

Однако такой подход слабо применим для наиболее ответственных сооружений. Скорее всего, эти обстоятельства вызвали включение в СНиП 2.06.04-82* следующего требования: «Нагрузки от волн и льда на гидротехнические сооружения I класса, а также расчетные элементы волн на открытых и огражденных акваториях необходимо уточнять на основе натуральных наблюдений и лабораторных исследований». То есть полученные расчетным путем элементы волн необходимо сравнивать с данными натуральных наблюдений в районе строительства и корректировать по результатам такого сравнения. Эта норма относится к наиболее ответственным гидротехническим сооружениям I класса, хотя целесообразно использовать подобное требование и в других случаях существенной волновой нагрузки.

Метод определения расчетных характеристик волн в СНиПе представляет собой метод эквивалентного волнения [3]. В соответствии с функцией распределения скорости ветра по данному волноопасному направлению (режим штормов) определяется расчетный шторм, соответствующий классу сооружения. Этот расчетный шторм принимается эквивалентным режиму штормов для района строительства.

Однако параметры расчетного шторма невозможно напрямую сравнить с данными натуральных измерений волнения в районе площадки строительства, даже если такие данные имеются. Это объясняется тем, что данные измерений относятся к конкретным времени и гидрометеорологическим условиям, а расчетный шторм является виртуальным, эквивалентным с точки зрения определения нагрузки на проектируемое сооружение многолетней последовательности штормов.

Другой подход к определению расчетных параметров волнения на подходе к сооружению использует реанализ с целью восстановления гидрометеорологических условий для района строительства за достаточно длительный предшествующий период (несколько десятилетий) и определения характеристик сильных штормов за этот период [4, 5].

Для определения режимных характеристик волнения в открытом море на подходе к проектируемому объекту используются данные анализа полей ветра за последние 30–50 лет, на основе которых выделяются периоды наиболее сильных штормов в рассматриваемом регионе. Характеристики волн рассчитываются на основе численной модели SWAN. Такой подход, ставший общепринятым в современных зарубежных и российских исследованиях [6, 7], позволяет получить волновые характеристики непосредственно в исследуемом районе, где нет постоянных станций наблюдений за волнением.

При реанализе гидрометеорологических условий устанавливаются характеристики конкретных штормов, которые можно сравнить с данными прямых измерений волнения в регионе. Таким образом, удается выполнить приведенное выше требование СНиПа по уточнению расчетных характеристик волнения сравнением с данными натуральных измерений.

Такой подход является развитием методологии СНиП 2.06.04-82*, так как полученную последовательность штормов можно использовать для построения функций распределения высот и периодов волн. Кроме того, если расчетный шторм обеспеченностью один раз в сто лет (для сооружений I класса) определен на основании данных многолетних наблюдений за ветром, то из последовательности штормов, полученных реанализом, можно выделить шторма, близкие по характеристикам к расчетным.

Реанализ гидрометеорологических условий не противоречит СНиП 2.06.04-82*: согласно распоряжению правительства РФ №1047-р от 21 июня 2010 г., этот СНиП включен в «перечень национальных стандартов и сводов правил, в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», но без упомянутого выше приложения 1. Таким образом, данное приложение в настоящее время является не обязательным, а рекомендуемым, а изложенные в нем расчетные методы можно применять в условиях, которые не противоречат ограничениям этих методов.

В случае проектирования сооружений, подверженных волновому воздействию, использование расчетных методов из Приложения 1 к СНиП 2.06.04-82* возможно только для относительно простых условий и требует специального обоснования. Использование этих методов в других случаях приводит к невозможности определить степень достоверности расчетных параметров ветровых волн.

Определение расчетных штормов на примере проекта берегозащиты Имеретинской низменности

В качестве примера применения метода реанализа гидрометеорологических условий для определения расчетных параметров волн приводятся данные по проекту берегозащиты в регионе Имеретинской низменности (Черное море, г. Сочи) [8, 9].

Волновой режим побережья Имеретинской низменности моделируется по многолетним данным полей ветра над Черным морем с последующим расчетом трансформации волн в прибрежной зоне на основе уравнений приближения пологих склонов. Такой подход позволил рассчитать волновые параметры наибольших штормов последних десятилетий непосредственно в береговой зоне Олимпийского комплекса и оценить влияние проектируемых берегозащитных сооружений на изменения волновых характеристик в прибрежной зоне.

Для определения режимных характеристик волнения в открытом море на подходе к Имеретинскому побережью использовались данные анализа полей ветра над Черным морем в 1980–2010 гг., выделялись периоды наиболее сильных штормов за это время в рассматриваемом регионе. Характеристики волн рассчитывались на основе модели SWAN [9]. Этот подход является развитием ранее используемых методов, в которых расчет волновых полей для района Имеретинской низменности основывался на полях ветра, определяемых по данным справочного руководства [10].

Для расчетов характеристик волн на глубоководной границе Имеретинского побережья анализировались данные реанализа NCEP/NCAR полей ветра в период с 1980 по 2010 годы с привлечением данных, уточненных по спутниковым наблюдениям и измерениям волн в регионе.

В качестве основного источника метеорологических данных после 1999 г. использовались метеорологические поля «финального анализа» NCEP [11, 12], в котором проводилась дополнительная корректировка метеополей за счет данных спутниковых дистанционных наблюдений.

Для расчетов волновой моделью SWAN в указанный 30-летний период выбирались периоды сильных ветров, румбов от Южного до Северо-Западного со скоростью ветра 12 м/с и более, которые могут приводить к высоким штормовым волнам на побережье в районе г. Сочи. Ветер оценивался для всей восточной части Черного моря (восточнее Керчи). Всего в период 1979–2010 гг. по указанному критерию было выявлено 67 сильных штормов.

Расчеты волнового поля проводились спектральной моделью SWAN на трех регулярных прямоугольных сетках в сферических координатах (широта – долгота). Первая сетка включает в себя весь район Черного моря. Размер квадратной ячейки первой сетки равен 90 с. Вторая сетка вложена в первую и включает в себя прибрежную зону г. Сочи. Размер ячейки этой сетки составляет 9 с. Третья сетка, вложенная во вторую, покрывает район Имеретинской бухты от устья р. Мзымта до р. Псоу, причем размер ячейки этой сетки также в 10 раз меньше размера ячейки предыдущей (второй) сетки и равен 0.9 с. Батиметрия для расчетных сеток интерполировалась в узлах сеток по общедоступным в сети Интернет топографическим данным GEBCO на 30-секундной сетке, а для прибрежной части Имеретинской бухты использовались глубины, измеренные эхолотом в рамках разработки проекта берегозащиты.

Расчеты производились спектральной моделью SWAN в три этапа – на каждой из трех вложенных сеток с последовательной передачей данных в граничных точках между ними.

По результатам расчетов характеристик 63 самых сильных штормов, выявленных в период 1980–2010 гг., проведен анализ их статистических характеристик по методике ВМО [13, 14, 15]. Для оценки повторяемости штормовых волн в режиме построены графики эмпирических интегральных функций распределения вероятностей высот волн (ИФРВ) у мористой границы прибрежной шельфовой зоны в районе восточной оконечности порта. Переход от ИФРВ к значениям обеспеченности P проводится по формуле $P = 1 - \text{ИФРВ}$, и, соответственно, повторяемость шторма n (количество лет, раз в которые может быть превышено значение данного параметра) $n = 1/P$. Аналогично определялась повторяемость волновых периодов.

Полученные функции распределения высот волн не отличаются от ИФРВ, полученных стандартным методом по данным измерений ветра (СП 38.13330.2012, СНиП 2.06.04-82*).

В таблице 1 представлены 15 самых сильных штормов в указанный период, ранжированных по высоте значительной волны, а в таблице 2 – рассчитанная повторяемость высот и периодов волн в системе штормов.

Таблица 1. Максимальная высота значительных волн и направление подхода волн в 15 самых сильных штормах периода 1980–2010 гг.

№	Год, месяц–день, часы: минуты пика шторма	Высота значительных волн обеспеченностью 13 %	Направление, градусы
1	1993,01–25,00:30	7.02	214
2	1987, 01–27, 08:30	6.67	217
3	1987, 01–03, 08:30	6.66	216
4	1989, 12–07,18:30	6.65	217
5	1983, 03–07, 23:00	6.13	228
6	2006, 03–03, 23:00	5.91	241
7	2011, 11–16, 21:30	5.82	240
8	1998, 02–17, 10:00	5.81	183
9	1995, 01–01, 16:00	5.78	208
10	1999, 12–29, 02:30	5.76	228
11	1983, 12–28, 23:00	5.59	241
12	2007, 11–11, 14:00	5.58	228
13	1992, 01–17, 21:30	5.52	215
14	2001, 02–22.13:00	5.46	217
15	2001, 10–24.07:30	5.42	235

Таблица 2. Параметры значительных волн различной повторяемости в системе у мористой границы порта Имеретинский

Повторяемость, 1 раз в n лет	ИФРВ	H, м	T, с	Даты близкого по параметрам шторма
1	0	3.1	5.7	
5	0.8	5.5	7.5	
10	0.9	5.8	8.0	1995-01-01, 1998-02-17, 1999-12-29, 2006-03-03, 2007-11-11,
25	0.96	6.5	8.4	1989-12-07, . 1987-01-03, 1987-01-27
50	0.98	7.0	9.5	1993-01-25

Как следует из представленных результатов, 15 самых сильных штормов в регионе имеют обеспеченность в режиме 2–20 %. Среднее направление подхода волн к линии береговой зоны по этим 15 штормам – 222 градуса. При этом среднее направление подхода волн четырех самых сильных штормов составляет 216 градусов при отклонениях всего в 1–2 градуса в этой группе. Таким образом, можно заключить, что к морской границе участка Имеретинского побережья с учетом его экспозиции самые высокие волны подходят в основном фронтально.

Тестирование результатов расчетов по данным натурных наблюдений возможно только с привлечением результатов измерений на других участках. Непосредственно в береговой зоне Имеретинской низменности такие измерения не проводились.

Тестирование модели проводилась на основании измерений волнографа – буй Южного отделения ИО АН в районе г. Геленджика для шторма февраля 2003 г. [16]. Буй установлен на глубине 85 м в точке с координатами 44°30.4 с. ш , 37°58.8 в. д. Условия в месте установки буя относятся к глубоководным, поэтому измерения используются для уточнения расчетов по ветро-волновой модели. Расчеты волн в мелководной зоне уточняются с помощью измерений на ВИС «Сочи», а также с помощью физического моделирования.

Значения параметров волн в точке установки буя определялись из результатов расчета на вложенной сетке (с десятикратным сгущением по сравнению с сеткой №1) для района г. Геленджика. Сравнение рассчитанных и измеренных высот волн представлено на рисунке 1 и в таблице 3. Модель SWAN рассчитывает значительные высоту волн и период (13 % обеспеченности), высоты и периоды волн другой обеспеченности рассчитывались по формулам распределения волн различной обеспеченности в системе шторма, представленным в справочном руководстве [16]. В таблице 3 также приведены значения высот и периодов волн 0.1 % обеспеченности, рассчитанные таким способом по значительным параметрам волн.

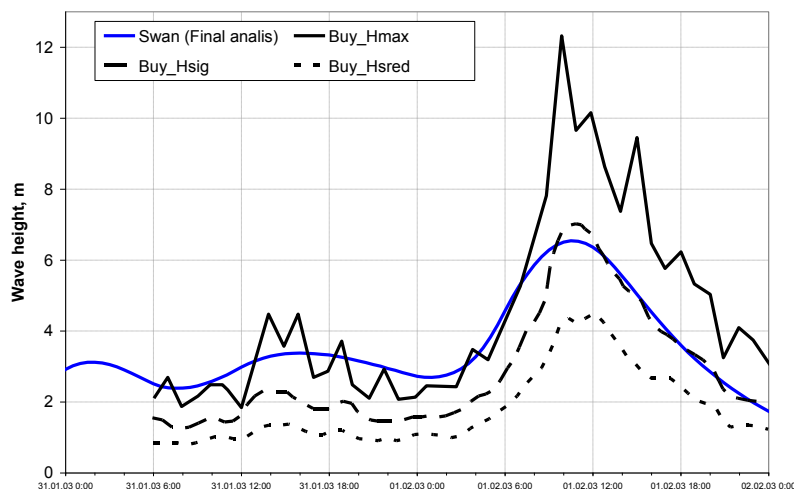


Рисунок 1. Сравнение высот волн, рассчитанных и измеренных волномерным буюм возле г. Геленджика

Таблица 3. Сравнение параметров волн с данными измерений для буя возле г. Геленджик

Характеристики волн Метод определения	Средняя высота волн, м	Средний период, с	Высота значительных волн $h_{13\%}$, м	Период значительных волн $T_{13\%}$, с	Высота волн $h_{0.1\%}$, м	Период $T_{0.1\%}$, с	Пиковый период по SWAN, с
Измеренные	4.32	8.9	7.0		$h_{\max} = 12.34$	10.3	
Рассчитанные по SWAN			6.54	7.89			11.64
Рассчитанные статистически	4.09	8.9			12.15	10,34	

Проводилось также сравнение результатов расчетов с данными волноизмерительной станции (ВИС) «Сочи», которая находится в точке с координатами: 43 град 33 мин 53 с с. ш., 39 град 44 мин 32 с в. д. Наблюдения за волнением моря производятся визуально с помощью перспектметра ГМ-12, установленного в помещении станции. Наблюдения ведутся по металлической свае, установленной на расстоянии 200 м от уреза воды. Глубина моря в месте установки сваи 5 м.

На рисунке 2 представлены результаты сопоставления высот и периодов волн, рассчитанных моделью SWAN, с данными наблюдений на ВИС «Сочи» для экстремального шторма 11 ноября 2007 г.

Проведенное сравнение показывает, что высоты значительных волн во время штормов находятся в приемлемом диапазоне согласия с измеренными высотами волн. С измеренными периодами волн хорошо согласуются значения пиковых периодов, рассчитываемые SWAN. При этом следует отметить, что в книге разработчика SWAN [6] показано, что при визуальных измерениях (как на ВИС «Сочи») происходит систематическое завышение среднего периода волн при высоких штормах, поэтому именно с рассчитанным пиковым периодом может сопоставляться «наблюдаемый» средний период волн.

Кантаржи И.Г., Кузнецов К.И. Натурные измерения волнения при определении нагрузок на морские гидротехнические сооружения

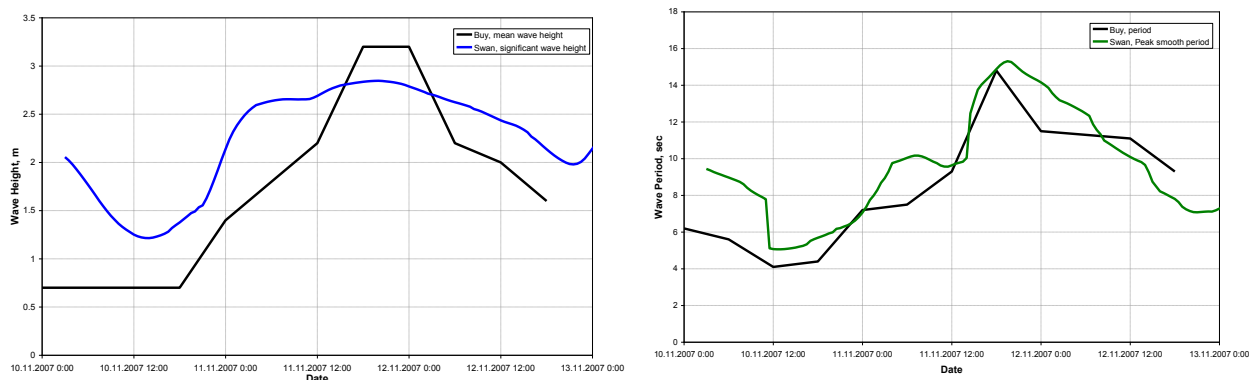


Рисунок 2. Сравнение измеренных на ВИС «Сочи» и рассчитанных высот, значительных высот и пиковых периодов волн во время шторма 11 ноября 2007 г.

Восточный участок берега Имеретинской бухты от р. Мзымта до мыса Константиновский имеет крайне сложный рельеф подводного склона, обусловленный наличием подводных каньонов (рис. 3). Каньон Новый вплотную подходит к берегу, его бровка выражена в рельефе с глубин 7–8 м. Русло каньона относительно прямолинейное. Фронтальная часть каньона имеет ширину около 400 м. По данным повторных обследований, бровка каньона Новый продвигается в сторону берега со средней скоростью 1,0 м/год.

Волны над подводными каньонами могут фокусироваться, существенно увеличиваясь по высоте. При этом высокие и крутые волны проходят по руслу каньона к берегу, производя катастрофические воздействия на сооружения и пляжи. Так, по данным BBC News Europe¹, в январе 2013 г. на побережье Португалии, над каньоном Nazare наблюдалась рекордно высокая волна высотой 100 футов (около 30 м). В том же месте в ноябре 2011 г. была зафиксирована рекордная волна высотой 78 футов (24 м), занесенная в Книгу рекордов Гиннеса. Эффект фокусирования волн над каньонами не описывается методикой расчета рефракции волн, основанной на геометрической оптике (СНиП 2.06.04-82*, Приложение 1).

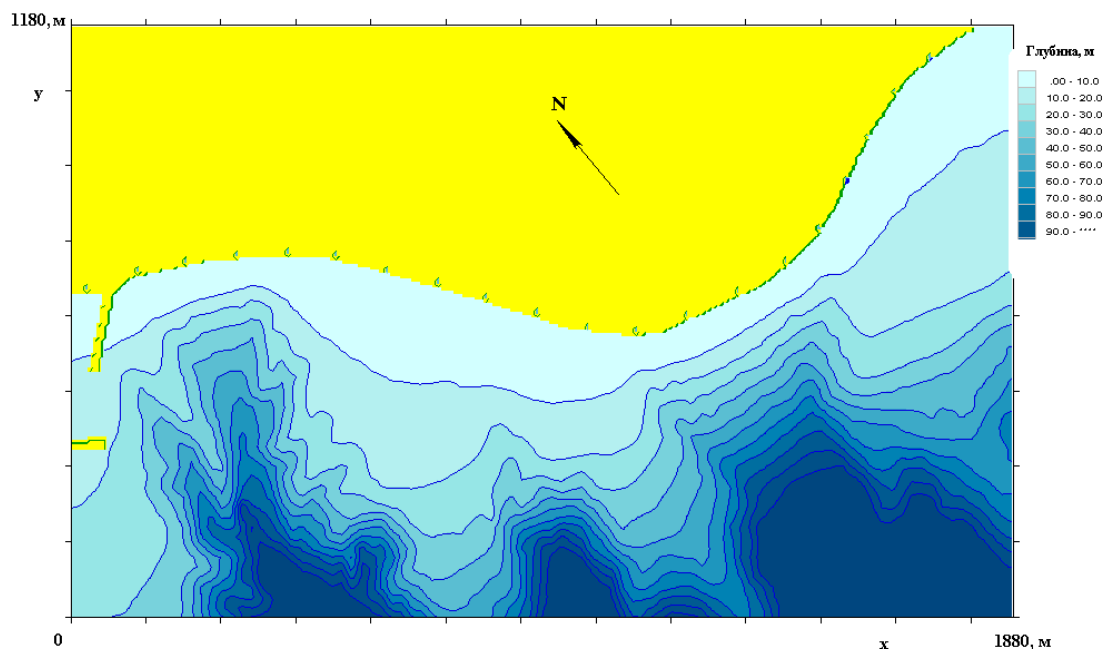


Рисунок 3. Батиметрический план подводного берегового склона для восточного участка береговой зоны Имеретинской низменности (с каньонами)

Волновые поля для прибрежной зоны Имеретинской низменности моделировались моделью SWAN на неструктурированных сетках. Выбор неструктурированных сеток для расчета

¹ <http://www.bbc.com/news/world-europe-21257762>

Кантаржи И.Г., Кузнецов К.И. Натурные измерения волнения при определении нагрузок на морские гидротехнические сооружения

прибрежных волновых полей был сделан ввиду необходимости более детального разрешения численной сетки (около 6 м) в районе береговой линии, что позволило более точно учесть влияние сложной батиметрии области и избежать ошибок интерполирования в дальнейших расчетах гидродинамических моделей.

Рассчитывались штормовые сценарии за 5 лет с 1983 по 1987 гг., а также 3 больших шторма – декабрь 1989 г., январь 1993 г. (максимальный за 30-летний период) и ноябрь 2007 г. На морской границе расчетной сетки задавались волновые спектры, полученные из расчетов на сетке №2 района г. Сочи.

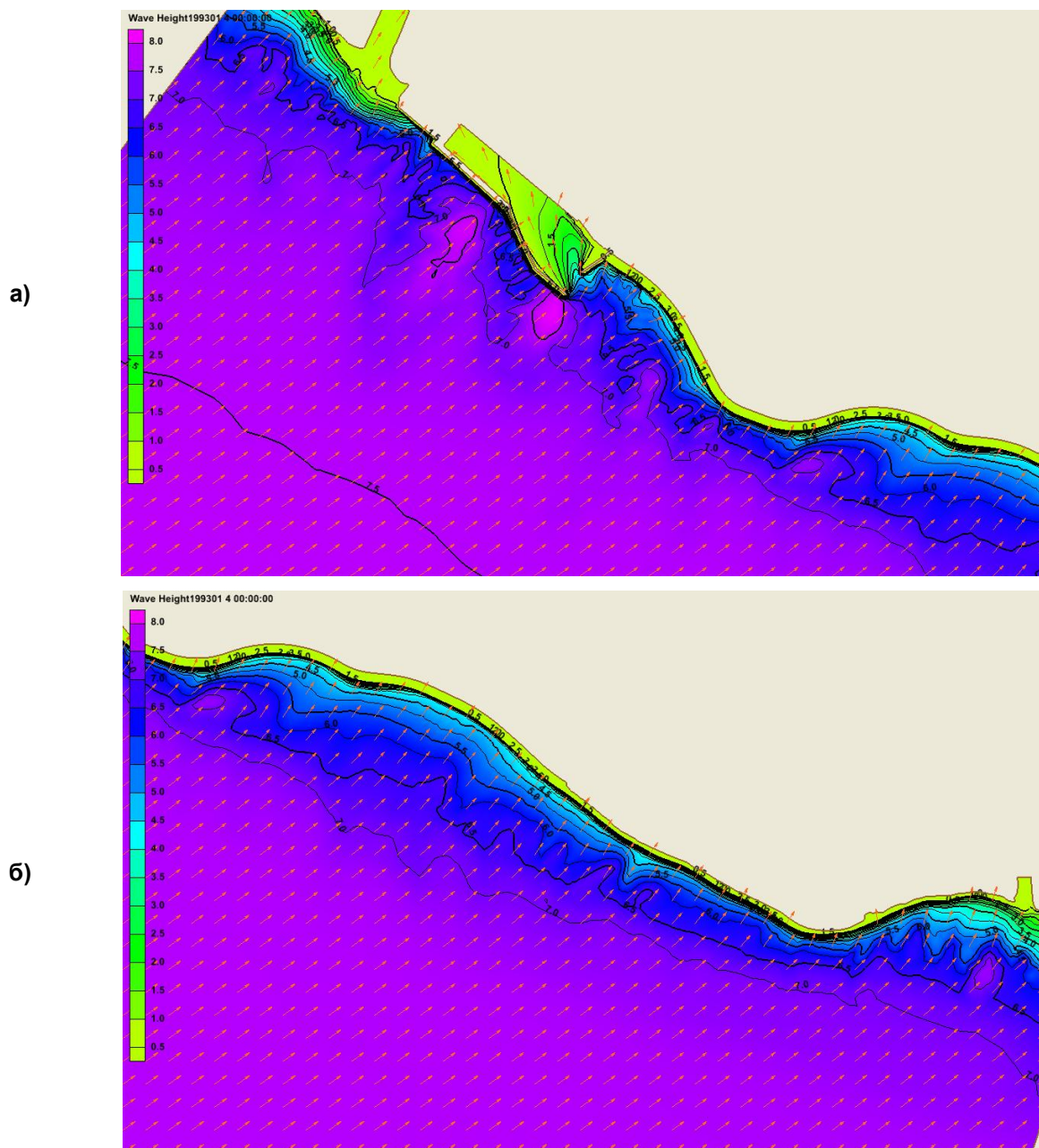


Рисунок 4. Поле значительных высот волн во время пика шторма в январе 1993 г.: а) участки от р. Мзымта до мыса Константиновский; б) участки от мыса Константиновский до р. Псоу

Примеры расчета волновых полей прибрежной зоны для шторма в январе 1993 г., который имеет повторяемость в режиме 2 % (раз в 50 лет), показаны на рисунке 4. Как видно из рисунка, в основном направление подхода больших волн – юго-западное. Расчеты для всех рассмотренных штормов показывают, что на глубокой воде, на расстоянии 1.5–2 км от берега, высота подходящей волны составляет около 7 м (1987, 1989 гг.), а для шторма 1993 г. – 7.5 м. Наиболее опасными участками для волнозащитной дамбы являются ее восточное окончание – участок длиной 150 м – Кантаржи И.Г., Кузнецов К.И. Натурные измерения волнения при определении нагрузок на морские гидротехнические сооружения

и середина этой дамбы. В районе восточного мыса могут подходить большие волны высотой от 7.4 м в штормах 1987 г. и 1989 г. до 8 м в шторме 1993 г., что можно объяснить близостью глубоководного каньона Новый. К середине волнозащитной дамбы могут подходить волны от 7 м (1987, 1989 г.) до 7.5 м (1993 г.). В районе мыса Константиновский большие волны, не трансформируясь на глубокой воде в каньоне, подходят достаточно близко к берегу, и поэтому на расстоянии 65 м от берега могут наблюдаться волны от 6.2 (1987 г.) до 6.6 м (1993 г.). В районе мыса Джарского (участок берега протяженностью 500 м западнее и 300 м восточнее мыса) большие волны тоже достаточно близко подходят к берегу, на расстоянии 30 м от берега могут появляться волны от 4.5 м (1987 г.) до 5.3 м высоты (1993 г.). Рассчитанные характеристики волн на внешней границе детальной расчетной сетки прибрежной зоны использовались для расчета полей волн в прибрежной зоне с детализированным описанием рефракционно-дифракционной моделью HWAVER, которая основывается в монохроматическом или в спектральном варианте на гиперболической аппроксимации уравнения пологих склонов [17]. На рисунке 5 показано волновое поле у побережья Имеретинской низменности, рассчитанное соответственно в периоды максимума шторма декабря 2009 г. спектральной версией модели HWAVER.

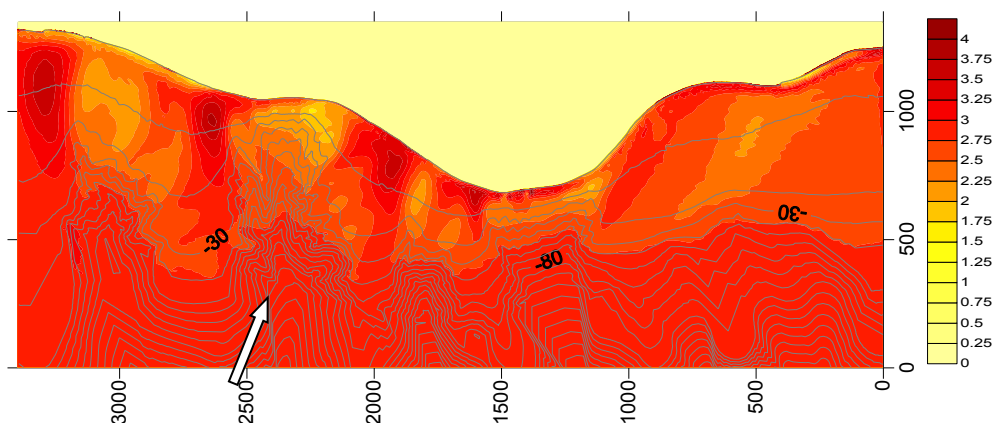


Рисунок 5. Поле значительных высот волн у Имеретинского побережья в период максимума шторма в декабре 2009 г., рассчитанное моделью HWAVER_S (падающая волна $H = 3.03$ м, $T = 9.22$ с).

Результаты расчетов показывают более выраженные зоны фокусировки и дивергенции в волновом поле, чем в аналогичных расчетах по модели SWAN, что обусловлено изрезанным рельефом прибрежной зоны Имеретинской низменности.

Уточнение расчетных параметров волн с помощью физического моделирования

Для дополнительной верификации расчетных характеристик волн для побережья Имеретинской низменности в мелководном бассейне Отраслевой научно-исследовательской лаборатории морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений Московского государственного строительного университета было выполнено физическое моделирование волн на выбранных опасных участках проектирования берегозащитной дамбы (рис. 6). Масштаб моделирования 1:25.

Высоты волн в процессе экспериментов измерялись в нескольких точках вдоль берегового профиля. Результаты измерений сравнивались с математическим моделированием трансформации волн.



Рисунок 6. Модель участка берега Имеретинской низменности под воздействием волн в бассейне МГСУ

Кантаржи И.Г., Кузнецов К.И. Натурные измерения волнения при определении нагрузок на морские гидротехнические сооружения

Моделирование трансформации волн на откосах для параметров модельных исследований проводилось по нелинейной численной модели, основанной на уравнениях Буссинеска – Железняк – Пелиновского (Серре) со специальными добавками [18]. Пример расчета трансформации волн на модельном береговом откосе показан на рисунке 7.

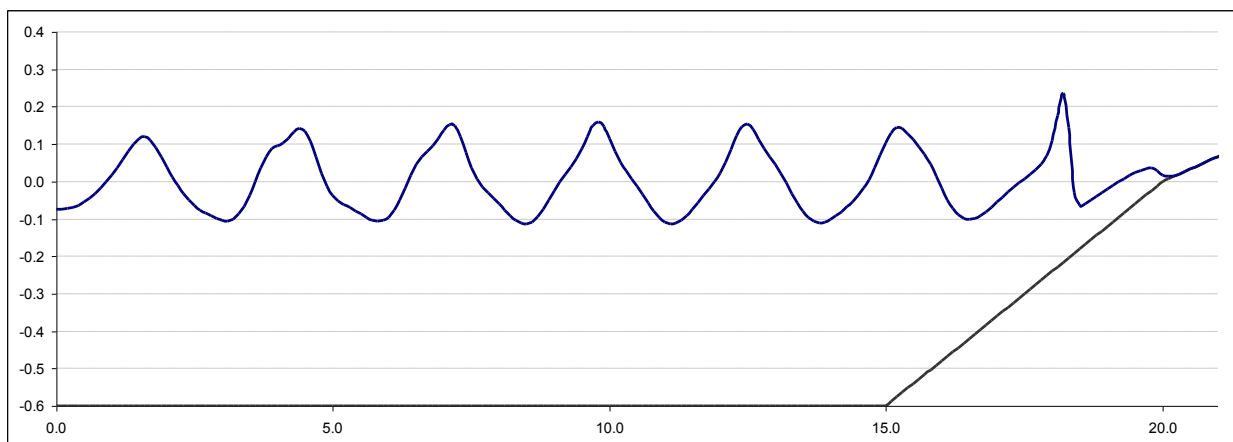


Рисунок 7. Пример математического моделирования трансформации волн на береговом откосе физической модели

Проведена статистическая обработка данных измерений и расчетов, построена регрессионная зависимость измеренных и рассчитанных высот волн. Результаты показаны на рисунке 8. Коэффициент корреляции измеренных и рассчитанных высот волн $R = 0.985$, что свидетельствует об очень хорошем согласовании результатов физического и численного моделирования.

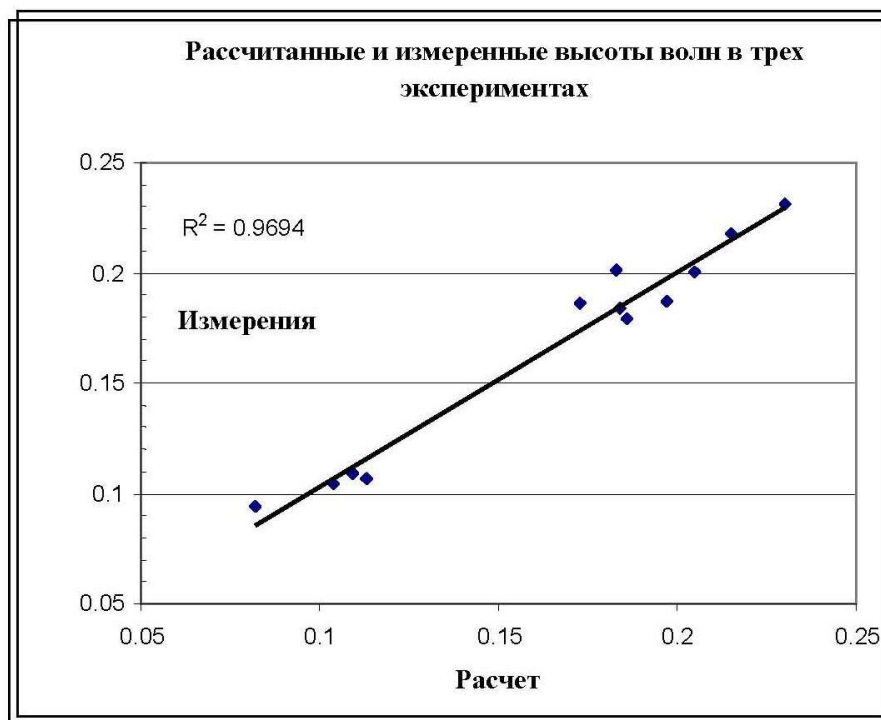


Рисунок 8. Сравнение высот волн, полученных физическим и численным моделированием

Однако если для береговой зоны Имеретинской низменности в г. Сочи удастся найти данные натуральных измерений волнения, хотя и не непосредственно для района проектирования, то во многих других случаях нет даже такой возможности.

Уточнение расчетных параметров волн с помощью натуральных измерений

Чем больше и доступнее объем натуральных данных при определении волновой нагрузки, тем безопаснее запроектированные и построенные сооружения. Если происходит авария, необходимо доказать, что шторм, который разрушил сооружение, был выше расчетного. Но при отсутствии данных натуральных наблюдений в районе проблемного сооружения проектировщики не могут оперировать конкретными значениями ветровых волн. Таким образом, необходимо постоянно проводить мониторинг характеристик волнения в районе сооружений: на стадии изысканий, строительства и эксплуатации сооружения.

Существующие измерители волнения по принципу исполнения можно разделить на две основные категории: притопленные и поверхностные. Каждый тип измерителей имеет свои достоинства и недостатки. Поверхностные измерители при технически более простой реализации имеют большую точность измерения характеристик волнения, нежели притопленные измерители. Однако такие приборы не позволяют проводить измерения при наличии ледового покрова, а также подвержены воздействию различных внешних факторов, например, сильного шторма. Кроме того, конструктивно поверхностные приборы реализуются несколько сложнее, а следовательно, дороже, чем притопленные.

Наиболее часто используются автономные притопленные измерители волнения, построенные на доплеровском эффекте и на измерении давления. Точность измерения волнения доплеровскими измерителями очень высокая, однако цена таких приборов высока. Автономные измерители давления существенно дешевле (в десятки раз) и не требуют дорогого и трудоемкого обслуживания.

В Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН уже в течение 6 лет применяется прибор разработки ООО СКТБ «ЭлПА». В основу прибора положен принцип измерения пульсаций давления, индуцируемых поверхностным волнением в толще моря. Автономный донный регистратор давления выполнен в корпусе из нержавеющей стали и имеет цилиндрическую форму. На рисунке 9 представлена принципиальная конструкция датчика.

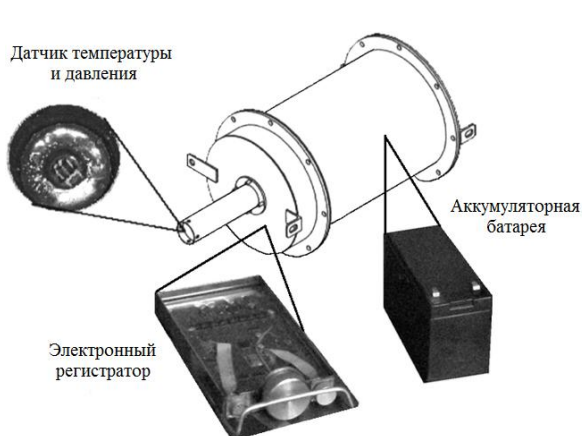
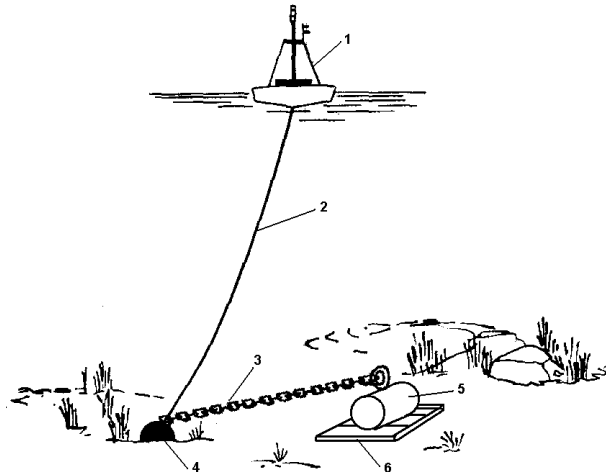


Рисунок 9. Конструкция автономного регистратора придонного давления АРВ-К



**Рисунок 10. Схема постановки автономного регистратора волнения с использованием поверхностной буйковой станции:
1 – поверхностный буй; 2 – буйреп; 3 – цепь;
4 – якорь; 5 – АРВ; 6 – рама**

Данный прибор применяется для проведения натуральных наблюдений волнения уже в течение 6 лет и зарекомендовал себя как надежный инструмент. Прибор обладает большим сроком автономной работы (6 мес.), относительно высокой частотой дискретизации (1 Гц) и небольшой относительной погрешностью измерения давления (0.06 %). Сам измеритель располагается на дне, от него идет плавучий трос, соединяющий его с якорем, который, в свою очередь, соединен с поверхностным бумом. Такая схема постановки автономного измерителя волнения приведена на рисунке 10.

Также измеритель волнения может крепиться на некоторый якорь или квадратную раму, которая будет удерживать прибор от биений под действием придонных течений. Однако при измерении с помощью таких датчиков коротких волн (волн зыби и ветровых волн) возникают проблемы регистрации, вызванные сильным затуханием таких волн с глубиной. Эта проблема подробно рассматривалась в работах [19, 20]. В рамках линейной потенциальной теории легко получить выражение для спектрального коэффициента ослабления поверхностных волн при измерениях в толще воды:

$$\sqrt{\frac{G_p(\omega)}{G_\eta(\omega)}} = \rho g R(\omega, d, D) = \rho g \frac{ch[k(\omega)d]}{ch(k(\omega)D)}, \quad (1)$$

где D – глубина моря; g – ускорение свободного падения; d – высота постановки датчиков над дном (в наших измерениях $d = 0,3$ м); ω – частота свободного падения; $k(\omega)$ определяется связью:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{ghQ(\alpha)} + \frac{\omega^4}{g^2}, \quad (2)$$

$$Q(\alpha) = 1 + 0.6522\alpha + 0.4622\alpha^2 + 0.0864\alpha^4 + 0.0675\alpha^5, \alpha = \frac{\omega^2 D}{g}.$$

Фактически соотношение (1) определяет связь спектральных компонент давления G_p (при условии его пересчета в смещение поверхности при использовании гидростатического соотношения) и смещения водной поверхности G_η в фурье-спектрах волновых полей.

Точность используемого датчика составляет 0.06 %, то есть при ослаблении сигнала более чем в 0.0006 раз шум датчика начинает маскировать реальный сигнал. Это надо учитывать при коррекции сигнала, чтобы не усилить шум прибора, который существенно более высокочастотный, чем ветровое волнение.

На рисунке 11 представлены энергетические спектры ветрового волнения и используемая передаточная функция, рассчитанная для этой записи. Поскольку передаточная функция экспоненциально нарастает в области высоких частот (малых периодов) и шум здесь значительно усиливается, то в соответствии с рекомендациями [21] в проведенных измерениях значения передаточной функции были ограничены 5 и спектр был обрезан на частоте 0.33 Гц.

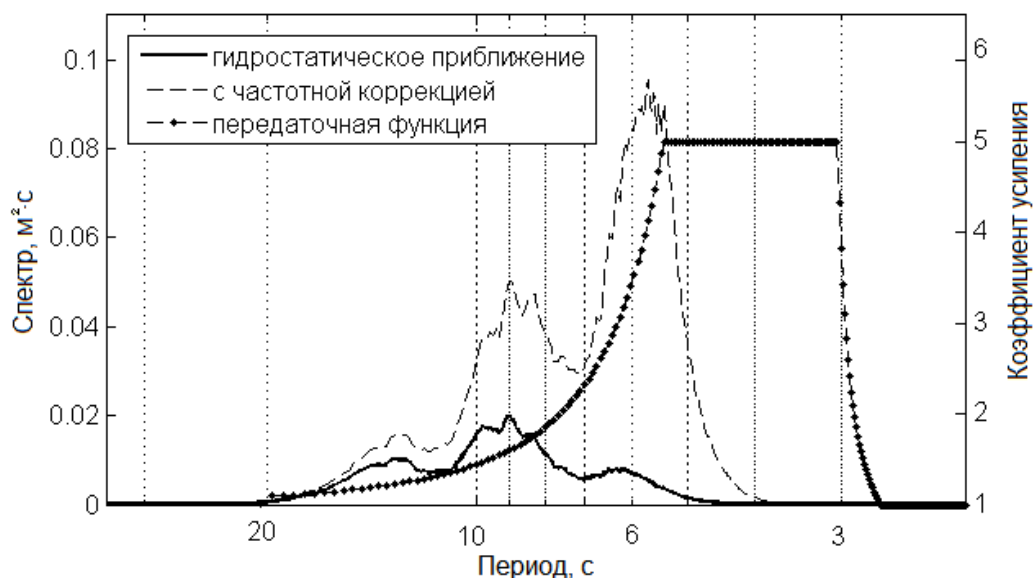


Рисунок 11. Пример передаточной функции для глубины 16 метров и усредненные спектры рассчитанных колебаний поверхности моря по формуле (1) и в гидростатическом приближении

В результате введенной частотной коррекции поправка в определении смещения уровня воды оказалась существенной, например, для датчика, расположенного в районе мыса Острый на Кантаржи И.Г., Кузнецов К.И. Натурные измерения волнения при определении нагрузок на морские гидротехнические сооружения

глубине 16 метров. Рассчитанная высота волны увеличилась примерно вдвое по сравнению с гидростатическим значением (рис. 12). Видно, что реальное поверхностное волнение будет существенно отличаться от флуктуаций давления, измеренных датчиком, установленным на глубине более 15 метров, и волн с периодами от 1 до 11 с, то есть ветровых волн и зыби. Отметим также, что период и фаза колебаний поверхности моря (рис. 12) не меняются при использовании частотной коррекции, а меняется только амплитуда волн.

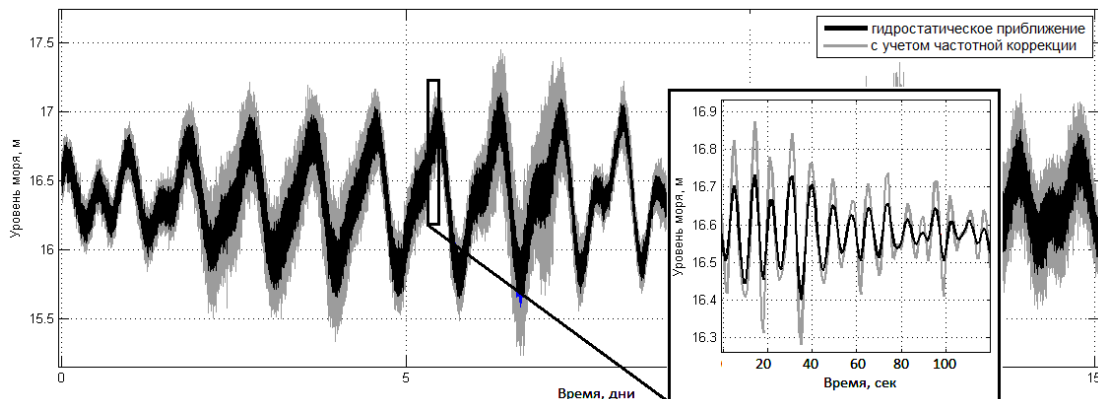


Рисунок 12. Отличие в форме рассчитанных колебаний поверхности моря при использовании гидростатической формулы (черная линия) и с помощью частотной коррекции (серая линия). Глубина постановки датчика 16 метров в районе мыса Острый

Следовательно, частотная поправка является принципиальной, и отличие в значениях высот волн, рассчитанных по гидростатической оценке и с учетом негидростатической поправки, достигает двух раз.

Однако важно, как данная теория будет работать в случае сильно нелинейного волнения. Поэтому с помощью аналитических и численных расчетов было проанализировано влияние нелинейности и дисперсии на колебания давления на дне.

В рамках негидростатической модели Железняк – Пелиновского [22], в которой учитываются произвольная нелинейность и слабая дисперсия, было получено явное выражение для колебаний морской поверхности с использованием точечного измерения придонного давления. Показано, что наличие нелинейности в дисперсионной поправке приближает эффективное смещение к гидростатическому приближению.

С помощью численного решения уравнения Эйлера в конформных переменных были получены сравнительные оценки давления на дне в рамках линейной теории и в рамках точного решения [22]. Показано, что линейная теория может недооценивать давление на дне, индуцированное сильнонелинейными поверхностными волнами ($ka = 0.08$, где k – волновое число, a – амплитуда волны), более чем на 17 % в мелководном бассейне ($kh = 0.58$, где h – глубина).

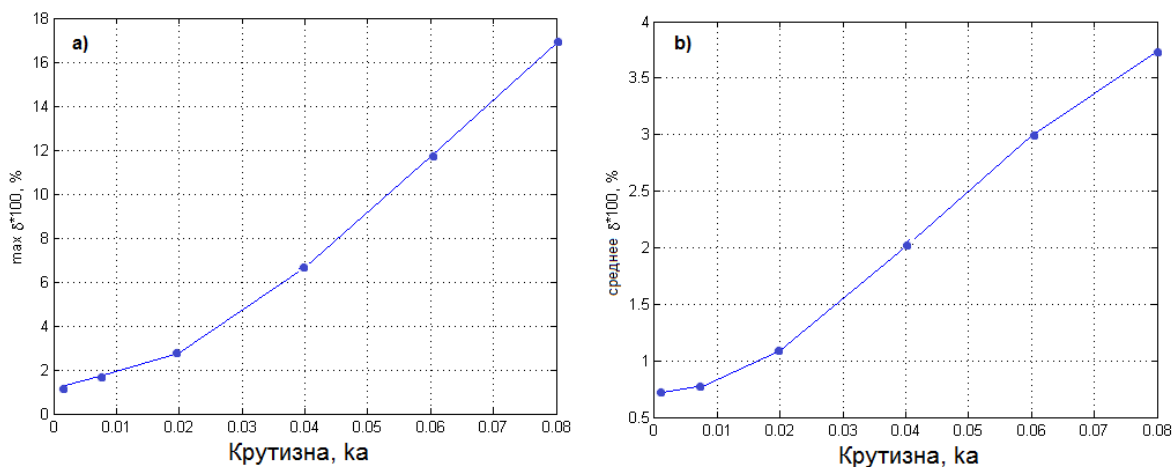


Рисунок 13. Зависимость а) максимума и б) среднего коэффициентов $\delta(t) \cdot 100$ от крутизны начальной волны ka , где $\delta(t)$ – разница между точным решением и линейной теорией

Кантаржи И.Г., Кузнецов К.И. Натурные измерения волнения при определении нагрузок на морские гидротехнические сооружения

Основываясь на полученных результатах, можно предположить, что вероятностные характеристики волнения, рассчитанные с применением линейной теории на основе натуральных данных с датчиков донного давления, могут быть практически использованы. Линейная теория не завышает высоты волн, следовательно, оценки, полученные по датчикам давления, корректны снизу. Кроме того, большая недооценка линейной теорией высоты волны справедлива только для волн большой крутизны, в то время как подавляющее большинство наблюдаемых волн на шельфе обладает небольшой крутизной.

Таким образом, датчики давления являются эффективным инструментом мониторинга волнения при проектировании гидротехнических сооружений.

Выводы

1. При проектировании современных морских гидротехнических сооружений для определения основных характеристик внешней волновой нагрузки необходимо применять технологию, удовлетворяющую требованиям актуальных нормативных документов. Технология включает использование математического моделирования волн для района проектирования, а также верификацию результатов расчетов с помощью данных натуральных наблюдений и экспериментальных исследований. Такой подход позволяет обеспечить надежное определение характеристик нагрузок и воздействий на уровне современных научных исследований.

2. В состав соответствующих инженерных изысканий, а также разрабатываемой проектной документации необходимо включать требование выполнять непосредственные измерения характеристик ветровых волн в районе проектирования. Такие измерения, в том числе в сложных природных условиях района проектирования, могут быть эффективно реализованы с помощью датчиков придонного давления.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам СП 1763.2013.5.

Литература

1. Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения. Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1990. 432 с.
2. Лопатухин Л.И. Ветровое волнение. СПб.: СПбГУ, 2012. 165 с.
3. Галенин Б.Г. [и др.] Ветер, волны и морские порты. Под ред. Ю.М.Крылова. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 263 с.
4. Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Куклев С.Б. Параметры ветрового волнения на защищенных акваториях // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. №4(10). С. 5–16.
5. Кантаржи И.Г., Шунько Н.В. Моделирование ледовых нагрузок на морские гидротехнические сооружения // Сборник научных трудов IV Всероссийской конференции «Ледовые и термические процессы на водных объектах России», 24–29 июня 2013, г. Рыбинск, Россия. М.: ИВП, 2013. С. 94–99.
6. Holthuijsen L.H. Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press, 2007. 236 p.
7. Holthuijsen L., Booij N., Ris R., Haagsma I.G., Kieftenburg A., Kriebitz E.E. SWAN Cycle III version 40.51, User Manual. The Netherlands: Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, 2009. 67 p.
8. Дикий П.В., Дзюба Н.Н., Железняк М.И., Сорокин М.В. Моделирование волнового режима побережья Имеретинской низменности // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2011. Vol. 7. No. 2. Pp. 54–63.
9. Железняк М.И., Кантаржи И.Г., Леонтьев И.О. Шахин В.М. Математическое моделирование береговых процессов Имеретинской низменности для обоснования берегозащитных мероприятий // Гидротехническое строительство. 2011. 10. С. 22–29.
10. Ветер и волны в океанах и морях: Справочные данные / Регистр СССРЛ.: Транспорт, 1974. 359 с.

Кантаржи И.Г., Кузнецов К.И. Натурные измерения волнения при определении нагрузок на морские гидротехнические сооружения

11. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Чернышева Е.С., Колесов А.М. Шторм на Черном море 11 ноября 2007 г. и статистики экстремальных штормов моря // Известия русского географического общества. 2009. №2(141). С. 71–80.
12. Типовые поля ветра и волнения Черного моря. Под ред. Э.Н. Альтмана, Г.В. Матушевского. Севастополь: СО ГОИН, 1987. 116 с.
13. Kalnay E., Kanamitsu M. [et al]. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. Vol. 77. Pp. 437–471.
14. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S., Hnilo, J., Fiorino M., Potter G. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bulletin of the American Meteorological Society. 2002. No. 11. Pp. 1631–1643.
15. WMO Guide to wave analysis and forecasting. WMO (Series); no. 702. Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization, 1998. 159 p.
16. Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пушкарев О.В. Экстремальное волнение в северо-восточной части Черного моря в феврале 2003 г. // Океанология. 2004. Т. 43. №6. С. 948–950.
17. Демченко Р.И., Железняк М.И. Гиперболическая аппроксимация трансформации волн на течениях прибрежной зоны // Прикладная гидромеханика. 2002. Т. 4. №2. С. 23–29.
18. Железняк М.И., Пелиновский Е.Н. Физико-математические модели наката цунами на берег. Накат цунами на берег. Горький: ИПФ АН СССР, 1985. С. 8–34.
19. Заславский М.М., Красицкий В.П. О пересчете данных волнографа с датчиком давления на спектр поверхностных волн // Океанология. 2001. Т. 41. №2. С. 195–200.
20. Ellis J.T., Sherman D.J., Bauer B.O. Depth Compensation for Pressure Transducer Measurements of Boat Wakes // Journal of Coastal Research. 2006. Vol. SI39. Pp. 488–492.
21. Tucker M., Pitt E. Waves in Ocean Engineering (Elsevier Ocean Engineering Series). Amsterdam: Elsevier, 2001. Vol. 5. 521 p.
22. Кузнецов К.И., Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н., Куркин А.А. Давление на дно, вызванное прохождением уединенной волны в прибрежной зоне // Экологические системы и приборы. 2013. №9. С. 36–42.

*Измаил Григорьевич Кантаржи, Москва, Россия
Тел. моб.: +7(903)533-78-30; эл. почта: kantardgi@yandex.ru*

*Константин Игоревич Кузнецов, Южно-Сахалинск, Россия
Тел. моб.: +7(908)154-20-50; эл. почта: konstantin.kouznetsov@gmail.com*

© Кантаржи И. Г., Кузнецов К. И., 2014

doi: 10.5862/MCE.48.6

Field measurement of waves for defining loads on marine hydraulic structures

I.G. Kantardgi*Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
+79035337830; e-mail: kantardgi@yandex.ru***K.I. Kuznetsov***Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
+79081542050; e-mail: konstantin.kouznetsov@gmail.com*

Key words

wave loads on hydraulic structures; calibration field measurements; method of reanalysis; Imeretinskaya Lowland; near-bottom pressure gauges

Abstract

In accordance with the current Russian normative documents, determining wave loads and impacts on hydraulic structures should be calibrated by field measurements and laboratory studies. However, it is problematic to satisfy this norm, because there are no measured wave parameters for the main coastal areas. Moreover, the equivalent virtually designed waves cannot be compared directly with the measured real ones.

The situation may be improved by the method of reanalyzing meteorological conditions for the region within 30–50 years and then modeling dangerous storms. The method of reanalysis has been applied for the coastal zone in Imeretinskaya Lowland in Sochi to develop the coastal protection structures. The calculated waves have been compared to the existing buoy measurement (Gelendzhik) and coastal wave station's measurement (Sochi).

It is advisable to take field measurement of waves with near-bottom pressure gauges. They are acceptable for complicated conditions. Surface waves are calculated by wave theory.

References

1. Lappo D.D., Strekalov S.S., Zavyalov V.K. *Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskiye sooruzheniya* [Loads and effects on hydraulic facilities]. Leningrad: VNIIG im. B.Ye. Vedeneyeva, 1990. 432 p. (rus)
2. Lopatukhin L.I. *Vetrovoye volneniye* [Wind waves]. Saint-Petersburg: SPbGU, 2012. 165 p. (rus)
3. Galenin B.G. [et al]. *Veter, volny i morskkiye porty* [Wind, waves and sea ports]. Edited by Yu.M.Krylov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 254 p. (rus)
4. Divinskiy B.V., Kosyan R.D., Kuklev S.B. Parametry vetrovogo volneniya na zashchishchennykh akvatoriyakh [Parameters of wind waves on security waters]. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2010. No. 4(10). Pp. 5–16. (rus)
5. Kantarzi I.G., Shunko N.V. Modelirovaniye ledovykh nagruzok na morskkiye gidrotekhnicheskiye sooruzheniya [Modeling ice loads on marine hydraulic structures]. *Sbornik nauchnykh trudov IV Vserossiyskoy konferentsii «Ledovyye i termicheskiye protsessy na vodnykh obyektakh Rossii»* [Proceedings of the IV All-Russian Conference "Ice and thermal processes in water objects of Russia"]. 24–29 June 2013. Rybinsk, Russia. Moscow: IVP, 2013. Pp. 94–99. (rus)
6. Holthuijsen L.H. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, 2007. 236 p.
7. Holthuijsen L., Booij N., Ris R., Haagsma I.G., Kieftenburg A., Kriezi E.E. *SWAN Cycle III version 40.51, User Manual*. The Netherlands: Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, 2009. 67 p.
8. Dikiy P.V., Dzyuba N.N., Zheleznyak M.I., Sorokin M.V. Modelirovaniye volnovogo rezhima poberezhya Imeretinskoy nizmennosti [Modeling wave regime of Imeretinskaya lowland coast]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2011. Vol. 7(2). Pp. 54–63.
9. Zheleznyak M.I., Kantarzi I.G., Leontyev I.O., Shakhin V.M. Matematicheskoye modelirovaniye beregovykh protsessov Imeretinskoy nizmennosti dlya obosnovaniya beregozashchitnykh meropriyatiy [Mathematic modeling of Imeretinskaya lowland coastal processes to justify bank protection measures]. *Power Technology and Engineering*. 2011. Vol. 10. Pp. 22–29. (rus)

10. *Veter i volny v okeanakh i moryakh. Spravochnyye dannyye* [Wind and waves in the oceans and seas: Reference data]. Leningrad: Transport, 1974. 359 p. (rus)
11. Lopatukhin L.I., Bukhanovskiy A.V., Chernysheva Ye.S., Kolesov A.M. Shtorm na Chernom more 11 noyabrya 2007 g. i statistiki ekstremalnykh shtormov moray [Storm on the Black Sea in November 11, 2007 and statistics and extreme storms of the sea]. *Izvestiia russkogo geograficheskogo obshchestva*. 2009. No. 2(141). Pp. 71–80.
12. *Tipovyye polya vetra i volneniya Chernogo morya*. Edited by E.N. Altman, G.V. Matushevskiy. Sevastopol: SO GOIN, 1987. 116 p. (rus)
13. Kalnay E., Kanamitsu M. [et al]. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. Pp. 437–471.
14. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S., Khnilo, J., Fiorino M., Potter G. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002. No 11. Pp. 1631–1643.
15. *WMO Guide to wave analysis and forecasting. WMO (Series); no. 702*. Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization, 1998. 159 p.
16. Divinskiy B.V., Kosyan R.D., Podymov I.S., Pushkarev O.V. Ekstremalnoye volneniye v severo-vostochnoy chasti Chernogo morya v fevrale 2003 g. [Extreme excitement in the north-eastern part of Black Sea in February 2003]. *Oceanology*. 2004. Vol. 43. No. 6. Pp. 948–950. (rus)
17. Demchenko R.I., Zheleznyak M.I. Giperbolicheskaya approksimatsiya transformatsii voln na techeniyakh pribrezhnoy zony [Hyperbolic approximation of wave transformation for a coastal zone]. *Applied Hydromechanics*. 2002. Vol. 4. No. 2. Pp. 23–29.
18. Zheleznyak M.I., Pelinovskiy Ye.N. *Fiziko-matematicheskiye modeli nakata tsunami na bereg. Nakat tsunami na bereg* [Physical and mathematical models of tsunami rolling ashore. Tsunami run-up on beach]. Gorkiy: IPF AN SSSR, 1985. Pp. 8–34. (rus)
19. Zaslavskiy M.M., Krasitskiy V.P. O pereschete dannykh volnografa s datchikom davleniya na spektr poverkhnostnykh voln [About recalculation wave recorder data with a pressure sensor on the spectrum surface waves]. *Oceanology*. 2001. Vol. 41. No.2. Pp. 195–200.
20. Ellis J.T., Sherman D.J., Bauer B.O. Depth Compensation for Pressure Transducer Measurements of Boat Wakes. *Journal of Coastal Research*. 2006. Vol. SI39. Pp. 488–492.
21. Tucker M., Pitt E. *Waves in Ocean Engineering (Elsevier Ocean Engineering Series)*. Amsterdam: Elsevier, 2001. Vol. 5. 521 p.
22. Kuznetsov K.I., Zaytsev A.I., Pelinovskiy Ye.N., Kurkin A.A. Davleniye na dno, vyzvannoye prokhozhdeniyem uyyedinennoy volny v pribrezhnoy zone [Pressure on the bottom caused by passage of a solitary wave in the coastal zone]. *Ecological Systems and Devices*. 2013. No. 9. Pp. 36–42. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 49–62