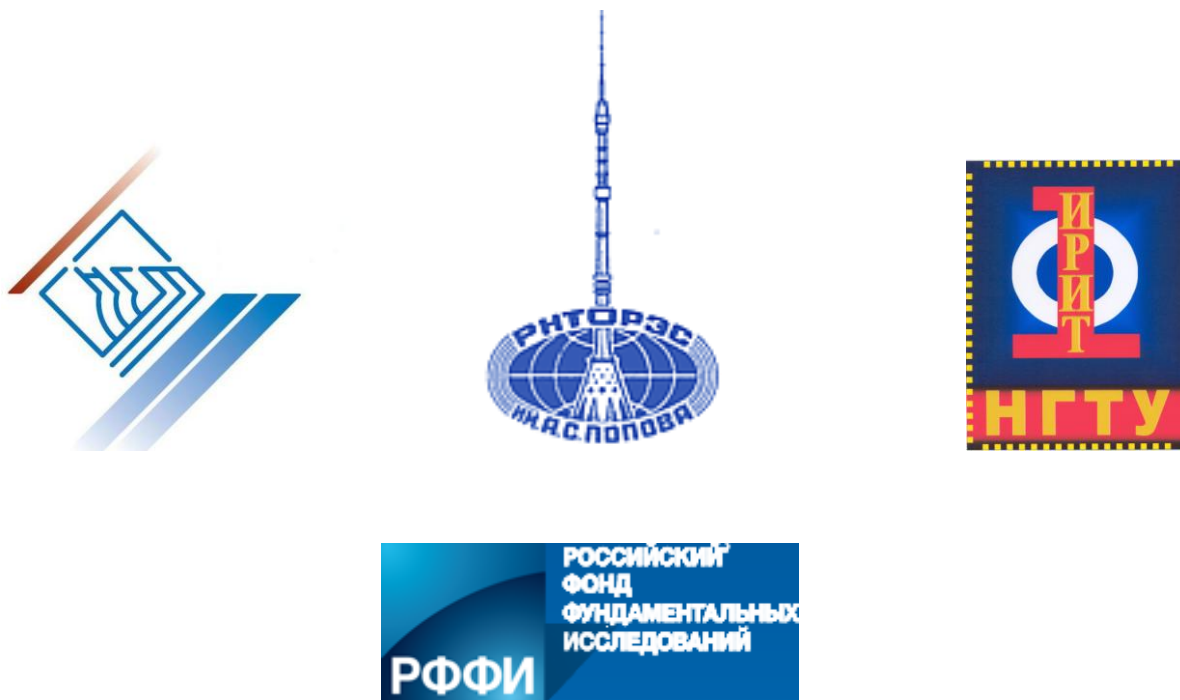


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО РАДИОТЕХНИКИ,
ЭЛЕКТРОНИКИ И СВЯЗИ им. А.С. ПОПОВА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ – 2020

*Сборник материалов XXVI Международной
научно-технической конференции*

© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексева, 2020

Нижний Новгород, 2020

УДК 621:681
ББК 32.97

Информационные системы и технологии - 2020: [Электронный ресурс]: сборник материалов XXVI Международной научно-технической конференции – Электрон. дан. – Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2020. – 1 электрон. диск (CD-ROM): зв., цв., 12 см. – Систем. требования: ПК с процессором 486; ОЗУ 8 Мб.; операц/ система Windows 95; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана. – 200 экз.

В сборнике представлены материалы докладов XXVI Международной научно-технической конференции, проведенной 24, 27, 28 апреля 2020 г. дирекцией Института радиоэлектроники и информационных технологий при поддержке, оказанной ректоратом НГТУ им. Р.Е. Алексеева с грантовым финансированием РФФИ в рамках проекта №20-07-20038.

Конференция проведена в режиме дистанционного доступа в формате вебинара на специализированной электронной платформе в сети Интернет.

Публикуемые материалы представляют тематику, круг научных интересов и состояние исследований представителей научных и высших учебных заведений Белоруссии, Украины и 21 города России - преподавателей, научных сотрудников, докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов - участников НИРС, а также сотрудников МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МЭИ, МГТУ «СТАНКИН», Высшей школы экономики, Владимирского государственного университета, Национального исследовательского Томского государственного политехнического университета, Орловского государственного университета, Пензенского государственного университета, Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Волжского государственного университета водного транспорта, Волго-Вятского филиала МТУСИ; представителей более 25 предприятий и НИИ: ИПУ РАН, РФЯЦ-ВНИИЭФ, ИПФ РАН, ИФМ РАН, НИИИС им. Ю.Е. Седакова, НИФТИ, НПП «По-лет», АПЗ им. П.И. Пландина, АПКБ и других организаций.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта №20-07-20038.

Организационный комитет:

А.В. Мякинков (председатель), В.П. Хранилов (зам.председателя), А.А. Куркин, Н.Ю. Бабанов, В.Г. Баранов, О.Г. Берестнева, Д.В. Жевнерчук, В.Ю. Карпычев, В.В. Кондратьев, В.Р. Милов, Д.А. Ляхманов, С.Л. Моругин, А.С. Раевский, А.Г. Рындык, Э.С. Соколова, Ю.М. Туляков, А.Д. Филинских, В.Л. Ягодкин

Редактор О.В. Пугина

Электронное издание подготовлено ЦДОТ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, компьютерная верстка С.А. Зубкова

ISBN 978-5-502-01322-2

Адрес издающей организации:

НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

© Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2020

РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ ПО ДАННЫМ РЕГИСТРАЦИИ ДАВЛЕНИЯ

¹Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Сопоставлены результаты синхронного лабораторного измерения гравитационных волн на поверхности воды и давления на разных горизонтах под волнами. Исследована прямая задача (расчет давления по данным смещения поверхности) и обратная задача реконструкции смещений волновой поверхности по полю давления в рамках линейной теории и теории Диста, учитывающей слабую нелинейность и дисперсию волн. Полученные амплитуды и формы волн, а также усредненные характеристики – асимметрия и эксцесс – сопоставлены с экспериментальными данными.

Ключевые слова: гравитационные волны на поверхности воды, давление под волнами, нелинейные волны, лабораторный эксперимент, численное моделирование, экстремальные волны.

Введение

Измерение вариаций давления под взволнованной водной поверхностью является чрезвычайно удобным способом регистрации морских волн. Сегодня к этому способу относится значительная доля имеющихся натуральных измерений волн, особенно в прибрежной зоне. В то же время задача восстановления характеристик волнения по данным давления на дне (обратная задача) нетривиальна (и неоднозначна). Наиболее часто для этого используются гидростатические формулы связи, реже – линейные формулы; известны примеры, когда такая реконструкция поверхностных волн приводит к большим ошибкам в определении их высот. В этой работе мы кратко обсуждаем результаты обработки данных синхронных измерений смещения поверхности во время прохождения волн и измерения вариаций давления на различных горизонтах под волнами [1] в сопоставлении с решением прямой и обратной задач в рамках различных теорий.

Полное давление под волной, P_{tot} , определяется суммой давления столба жидкости, отсчитываемого от невозмущенного уровня поверхности, и динамического давления, p , связанного с движением волн. Нормированное на плотность динамическое давление может быть записано через уравнение Бернулли

$$p \equiv \frac{1}{\rho} P_{tot} + gz = -\frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right) \quad (1)$$

и требует знания поля потенциала скорости $\varphi(x, z, t)$ в толще воды. Здесь z – вертикальная координата, растущая вверх, x – горизонтальная координата (рассматривается плоская задача), ρ – постоянная плотность жидкости, а g – гравитационная постоянная. Потенциал скорости определяется решением уравнения Лапласа в толще воды $-h \leq z \leq \eta$, где $\eta(x, t)$ свободная поверхность, а на дне $z = -h$ выполняется граничное условие непротекания

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right|_{z=-h} = 0. \quad (3)$$

Потенциал скорости связан с профилем смещения свободной поверхности нелинейным образом через граничные условия на поверхности $z = \eta$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad z = \eta, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 = 0, \quad z = \eta. \quad (5)$$

На рис.1 показан пример расчета полей давления по формуле (1) под интенсивными нерегулярными волнами, динамика которых рассчитывается согласно системе уравнений (2)-(5). Динамическое давление (рис.1, а) спадает с глубиной, что не может быть описано гидростатическим приближением. Соответственно, учет негидростатических эффектов становится с глубиной всё более важным (рис.1, б).

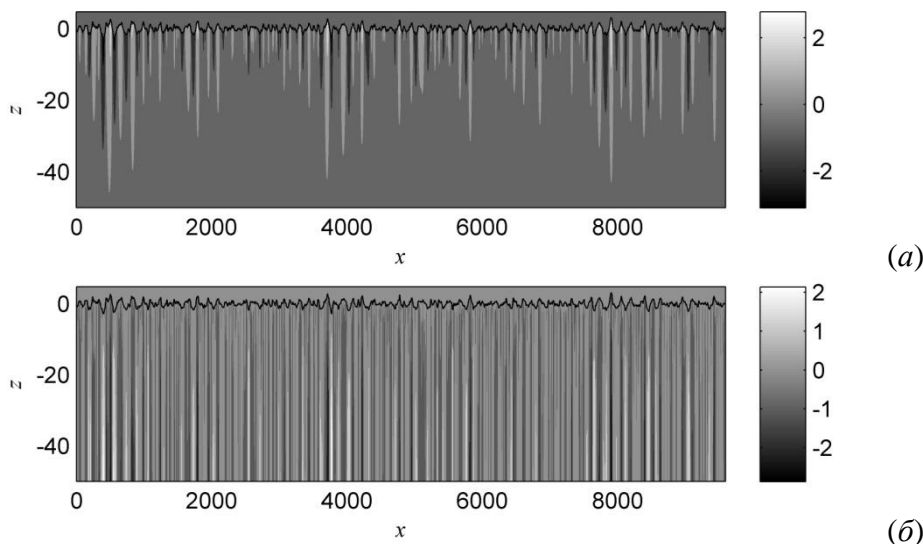


Рис. 1. Динамическое давление (а) и негидростатическое давление (б) под нелинейными волнами на глубокой воде – расчет уравнений Эйлера с учетом сильной нелинейности для условий: спектр JONSWAP, пиковый период $T_p = 10$ с, значительная высота $H_s = 3.5$ м. Оттенками серого показано давление, нормированное на ρg

Система (2)-(3) имеет точное решение, которое с использованием преобразования Фурье может быть представлено следующим в следующем виде

$$\varphi(x, z, t) = \hat{F}^{-1} \left\{ \hat{\phi}(k, t) \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} \right\},$$

$$\hat{\phi}(k, t) = \hat{F} \{ \phi(x, t) \}, \quad \hat{\phi}_t(k, t) = \hat{F} \left\{ \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial t} \right\}, \quad (6)$$

где $\phi(x, t) = \varphi(x, z=0, t)$ – потенциал скорости на невозмущенном уровне поверхности, а операторы $\hat{F}\{\cdot\}$ и $\hat{F}^{-1}\{\cdot\}$ являются прямым и обратным преобразованиями Фурье по пространственной координате x и волновому числу k соответственно,

$$\hat{F}^{-1}\{\hat{r}\} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \hat{r}(k) e^{-ikx} dk, \quad \hat{F}\{r\} \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} r(x) e^{ikx} dx. \quad (7)$$

В реальности временные записи смещения поверхности в одной точке чаще всего являются единственной информацией о волнах, которой недостаточно для определения функции поверхностного потенциала скорости. В предположении однонаправленных волн линейное приближение (4)-(5) дает связь между смещением поверхности и потенциалом. Хорошо известно, что в линейной теории однонаправленных волн для одной гармонике k_0 поле давления связано с полем смещения следующим соотношением

$$p = g\eta \frac{\cosh(k_0(z+h))}{\cosh(k_0h)}, \quad (8)$$

которое описывает спадание динамического давления с глубиной. Для анализа временных записей переход осуществляется согласно линейному дисперсионному соотношению

$$\omega = \sqrt{gk \tanh kh}, \quad (9)$$

где ω – циклическая частота.

Линейное решение (6)-(8) может быть модифицировано с учетом слабо нелинейных поправок, ограничиваясь длинными модуляциями волн (то есть, предполагая, что спектр волн достаточно узок с волновым числом доминирующих волн k_0), что составляет развитие модели Диста [2, 3]. В настоящей работе для построения теоретических полей давления использовались линейная теория и слабонелинейная теория модулированных волн.

Давление под нерегулярными волнами (прямая задача)

Лабораторные эксперименты по синхронному измерению смещения поверхности воды и полей давления при прохождении цугов регулярных волн и нерегулярных волн проводились в волновом лотке Технического университета Берлина длиной 15 м, шириной 0.3 м и глубиной 0.4 м [1]. Характерные параметры нерегулярного волнения, запись которого анализируется в этой работе, пиковый период $T_p = 0.7$ с, соответствующая ему циклическая частота $\omega_p = 2\pi/T_p = 9$ рад/с, средняя крутизна $\eta_{rms} k_p = 0.05$ и безразмерная глубина $k_p h = 3.3$, где пиковая частота и волновое число k_p связаны через дисперсионное соотношение (9), и η_{rms} – среднеквадратическое отклонение смещения поверхности, $k_p h$. Давление под волнами измерялось на разных горизонтах $z = -d$ в интервале $k_p d = 0.3 \div 1.4$.

Исследуемая временная запись нерегулярных волн длительностью 100 с (Рис. 2а) представляет собой несколько волновых групп и содержит аномально высокую волну. Для расчета полей давления на разных глубинах была применена линейная теория и теория Диста. Результат представлен на Рис. 2б как среднеквадратическое отклонение, Err , расчетных значений, p , от лабораторных данных, p_0

$$Err = \sqrt{\frac{\langle (p - p_0)^2 \rangle}{\langle p_0^2 \rangle}}. \quad (10)$$

В рамках теории Диста ошибка расчета давления составляет около 15% прямо под волнами и увеличивается с глубиной до 20%. Линейная теория демонстрирует лучшие результаты на большой глубине, чем теория Диста: ошибка составляет около 10% на самом глубоком датчике и увеличивается до 17% ближе к поверхности воды. Применение теории Диста оказалось удивительно неэффективным, хотя она учитывает нелинейность поверхностных волн,

которая значительна в рассматриваемом случае. Такой результат может быть связан с нарушением иерархии асимптотических членов в решении для давления в рамках модели Диста.

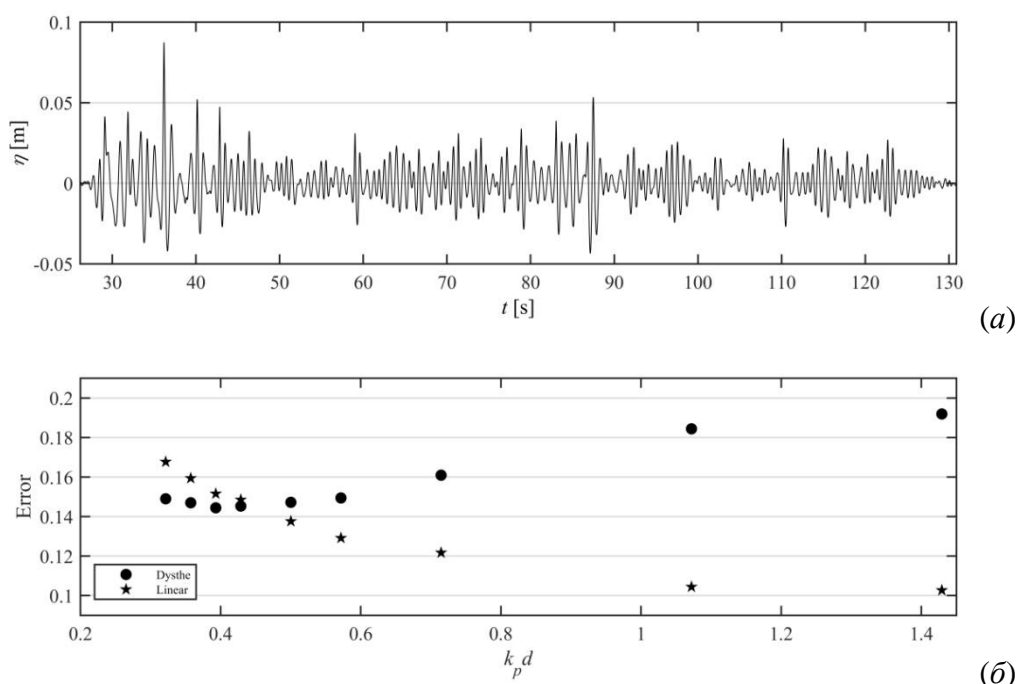


Рис. 2. Запись поверхностных волн (а) и ошибка относительно лабораторных данных расчета полей давления по линейной теории (звезды) и модели Диста (кружки) (б)

Восстановление смещения поверхности по давлению (обратная задача)

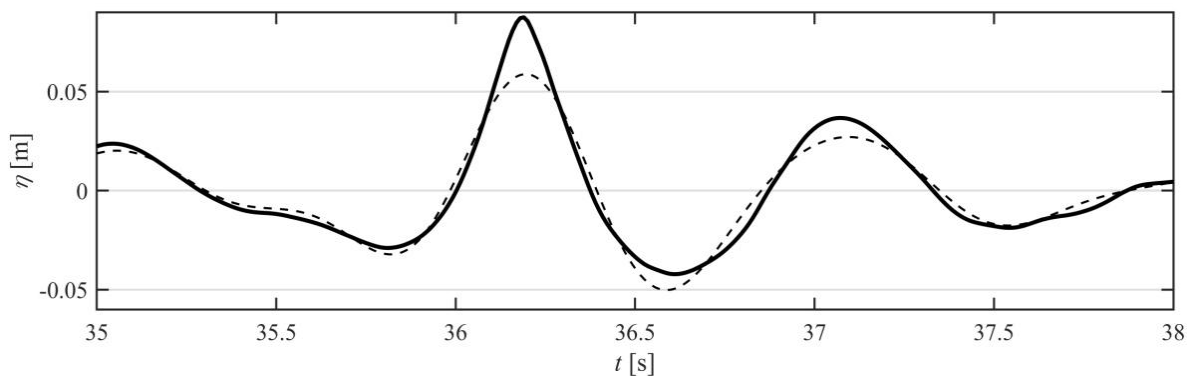
Реконструкция смещения поверхности по данным измерения давления на глубине выполнена с использованием линейной теории. Для восстановления использовалась только часть 100-секундной записи с отфильтрованными нелинейными гармониками 2-го порядка и выше. Порог фильтрации был выбран на основании рассмотрения различных измерений таким образом, чтобы в реконструированной записи не происходило роста амплитуды «хвоста» Фурье преобразования на высоких частотах. Примеры восстановления экстремальной волны из записи с глубин $k_p d = 0.37$ и $k_p d = 1.65$ представлены на рис. 3, а и рис. 3, б соответственно. Видно, что при восстановлении с измерения на горизонте вблизи поверхности результат оказывается значительно лучше, чем по данным измерения давления даже на не слишком большой глубине. В то же время экстремальная волна восстановлена довольно плохо в обоих случаях, что можно объяснить вырезанием высокочастотной части спектра давления, определяющей заостренность гребня волны. Смещение, восстановленное со значительной глубины (рис. 3, б), отличается от измеренного фазами и амплитудами волн.

По измеренным и восстановленным данным смещения поверхности были рассчитаны 3-й и 4-й статистические моменты волнового поля – асимметрия M_3 и эксцесс M_4

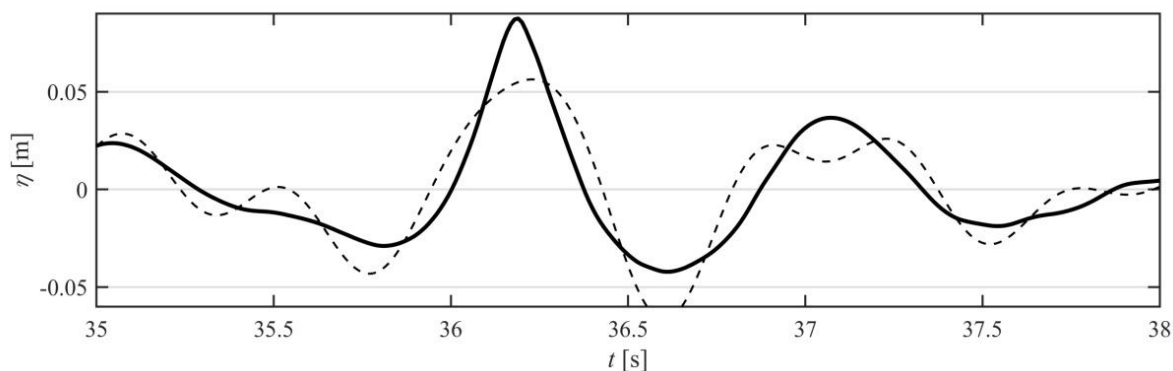
$$M_n = \frac{\langle (\eta - \langle \eta \rangle)^n \rangle}{\eta_{rms}^n}, \quad \eta_{rms} = \sqrt{\langle (\eta - \langle \eta \rangle)^2 \rangle} \quad (11)$$

с целью посмотреть, нельзя ли делать выводы о статистических свойствах смещения поверхности по статистическим моментам полей давления, не прибегая к процедурам восстановления поверхности. Для рассмотренного примера асимметрии давления и реконструированного

смещения хорошо коррелируют между собой, но значения для реконструированного смещения существенно отличаются от данных прямого измерения смещения (из-за примененной спектральной фильтрации). Экссесс смещения реконструируется удовлетворительно со всех глубин и близок по значению к данным прямым измерениям.



(a)



(б)

Рис. 3. Экстремальная волна: измерение смещения поверхности (сплошная линия) и реконструкция по данным давления (пунктирная линия), измеренным на горизонте $k_p d = 0.37$ (a) и $k_p d = 1.65$ (б)

Заключение

Исследование прямой задачи построения полей давления по измеренной вариации смещения поверхности в точке на примере нерегулярных интенсивных волн не показало явного преимущества использования слабо нелинейной модели Диста для волн с узким спектром по отношению к линейной теории. Основным источником ошибок модели Диста предположительно является ограничение по узости спектра, используемое при описании вертикальной изменчивости полей. Как следует из результатов численного расчета уравнений Эйлера, учет негидростатичности давления играет большую роль. Решение обратной задачи восстановления смещения поверхности по данным давления показало значительные ошибки при использовании линейной теории. Мы ожидаем, что использование модели Диста для решения обратной задачи может оказаться более эффективным в этом случае.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов 18-05-80019 и 19-55-15005.

Библиографический список

1. **Kokorina, A., Slunyaev, A., Klein, M.** Simultaneous measurements of gravity water waves at the surface and in the water bulk: analysis of the experimental record // *Geophys. Res. Abstracts*. 2019. V. 21. P. EGU2019-6014.
2. **Dysthe, K.B.** Note on a modification to the nonlinear Schrödinger equation for application to deep water waves // *Proc. Roy. Soc. London A*. 1979. V. 369. P. 105-114.
3. **Slunyaev, A., Pelinovsky, E., Hsu, H.-C.** The pressure field beneath intense surface water wave groups // *Eur. J. Mech. B / Fluids*. 2018. V. 67. P. 25-34.

A.V. Kokorina^{1,2}, A.V. Slunyaev^{1,2}

RECONSTRUCTION OF EXTREME SEA WAVES USING PRESSURE RECORDS

¹ Institute of Applied Physics RAS

² Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev

Purpose: The research aims at studying the methods of reconstruction of surface sea waves through pressure data.

Design/methodology/approach: The sea surface was reconstructed using pressure records within linear theory and the Dysthe theory using data of laboratory experiments and numerical simulations.

Findings: The results of simultaneous laboratory measurement of gravity surface waves and pressure at different horizons under the waves are compared. The direct problem (calculation of pressure according to the surface displacement data) and the inverse problem of reconstructing the displacements of the wave surface using the pressure data fields within linear theory and the Dysthe theory are investigated. The obtained amplitudes and wave shapes, as well as the statistical characteristics — asymmetry and kurtosis — are compared with experimental data.

Research limitations/implications: The application of employed methods is limited to weakly nonlinear and weakly dispersive case.

Originality/value: The research aims at solving one of the most important problems of oceanography – registration of the surface sea waves.

Key words: gravity surface waves, pressure under the waves, nonlinear waves, laboratory experiment, numerical modeling, extreme sea wave.