

УДК 629.124.74:622.242

А.В. Демидюк, Н.В. Ефремова, А.В. Чернецкий

**О НАЗНАЧЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНЕНИЯ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ОПЫТОВОМ БАССЕЙНЕ ОНМУ**

Розглянуті особливості призначення довжин та висот хвилювання при проведенні експериментів у дослідному басейні ОНМУ. Наведено порівняння профілів хвиль, швидкостей руху хвиль, відносних висот гребенів, відносних об'ємів хвиль, швидкостей перенесення об'ємів, які розраховані для мілководної акваторії за лінійною теорією, за теорією Стокса та за кноїдальною теорією. За результатами запропоновано уточнення методики експериментів.

Ключові слова: мілководдя, нелінійна теорія хвилювання, профіль хвилі, висота гребеня хвилі.

Рассмотрены особенности назначения длин и высот волнения при проведении экспериментов в опытном бассейне ОНМУ. Приведено сравнение профилей волн, скоростей распространения волн, относительных высот гребней, относительных объемов волн, скоростей переноса объемов, рассчитанных для мелководной акватории по линейной теории, по теории Стокса и кноидальной теории. По результатам предложено уточнение методики экспериментов.

Ключевые слова: мелководье, нелинейная теория волн, профиль волны, высота гребня волны.

Characteristics of wave height and length accepting for experiments in the towing tank of ONMU is observed. Results for some characteristics for shallow water defined due to linear, Stokes and cnoidal theories are introduced; characteristics are: wave's contour, wave's speed, relative wave's height, relative wave's volume and wave's volume speed. Improvement of experiment methodic due to calculation results is introduced.

Keywords: shallow water, non-linear wave theory, wave's contour, wave's crest height.

Введение. В задачах гидродинамики морских судов на волнении, как показывает анализ работ отечественных и многочисленных зарубежных авторов, происходит переход от линейных теорий и соотношений к нелинейным. Такой переход оправдан для ветровых волн предельной крутизны на глубокой воде, для длинных волн на значительном мелководье и в зоне разрушения волн.

Рассматриваются, например, нелинейные модели ветровых волн в шторме, нелинейные гидромеханические нагрузки на корпус судна [1], оценка поведения судна на сильном и экстремальном волнении с учетом переменности смоченной поверхности и взаимосвязи колебаний [2] и др.

© Демидюк А.В., Ефремова Н.В., Чернецкий А.В., 2015

Предлагаются наборы статистик по волнению: экстремальные (для режима выживания плавучего объекта) и оперативные (повторяемость высот волн, повторяемость периодов волн, совместная повторяемость высот и периодов волн, характеристика волн зыби, орбитальные скорости волн) [3].

В то же время в нормативных документах классификационных обществ для судов в рейсе нормируется только высота волны заданной обеспеченности. Глубина акватории определяется рекомендованным курсом, период (длина) волны не оговаривается [4].

Применение нелинейной теории в задачах динамики судна должно сопровождаться соответствующими экспериментальными исследованиями, в частности, для условий мелководья. Расчеты по нелинейной теории более трудоемки, чем по линейной, однако эти трудности – вопрос квалификации тех, кто выполняет расчеты. Что касается экспериментальной проверки, существуют еще ограничения, связанные с возможностями и особенностями экспериментальных установок.

Цель работы – анализ принятой в практике опытового бассейна ОНМУ методики выбора параметров волнения, путем сравнения характеристик волн, рассчитанных по линейной и нелинейной теории.

Изложение основного материала исследования. В опытовом бассейне ОНМУ выполняются следующие виды экспериментальных исследований [5-9]:

- определение буксировочного сопротивления моделей плавучих объектов на тихой воде и на регулярном волнении (на штатной экспериментальной установке);

- определение кинематических характеристик качки плавучих объектов на регулярном и импульсном волнении (на штатной экспериментальной установке);

- определение возмущающих сил и моментов, действующих на жестко закрепленную модель в условиях регулярного волнения (на специально спроектированной экспериментальной установке);

- определение обобщенных присоединенных массы и соответствующих коэффициентов демпфирования моделей (на модифицированной штатной экспериментальной установке методом вынужденных колебаний на тихой воде).

- определения характеристик силового воздействия прогрессивных волн конечной амплитуды на подводные сооружения (трубопроводы и волноломы).

Курсовые углы набегающего волнения устанавливаются в диапазоне $0-180^\circ$ с заданным шагом. Высота волн $H = 0,02-0,12$ м. Частота регулярного волнения изменяется в пределах $\omega = 3.5 \div 12.5 c^{-1}$. При $\omega < 3.5 c^{-1}$ характеристики качки могут быть определены на импульсном (кратковременном неустановившемся) волнении.

После модернизации, выполненной в 2009-2010 гг., появилась возможность модулировать частоту волнения, имитируя нерегулярность волнения по длине, при этом высота волн остается неизменной.

В расчетах остойчивости, ходкости и качки в качестве характерных длин волн используют длину судна, удвоенную длину судна и удвоенную ширину. Если для расчетов используется линейная теория, в которой не связаны между собой длина и высота волны, то диапазон длин волн от $\lambda_{\min} = 2B$ до $\lambda_{\max} = 2L$ (B и L - ширина и длина судна соответственно) с любым заданным шагом охватывает все возможные курсовые углы набегающего волнения и его можно использовать при любой глубине акватории. Для экспериментальной проверки расчетов используется тот же диапазон длин волн.

Относительные высоты волн в практике бассейна ОИИМФ (позднее ОНМУ) обычно принимались равными $\frac{H}{\lambda} = \frac{1}{40} \div \frac{1}{100}$ (где H - высота волны), причем меньшие значения соответствовали большим длинам волн. Увеличение высоты волны возможно, но может привести к неустойчивости волнения (при $\frac{H}{\lambda} \approx \frac{1}{30}$), особенно в условиях мелководья.

Кроме того, при малом запасе глубины под днищем модели и высоких волнах возможны удары модели о дно. Поэтому корректный выбор характеристик волнения в эксперименте прямо определяет его качество и достоверность.

Параметры задаваемого волнения должны определяться с учетом оптимального масштаба модели и характеристик волнения в условиях эксплуатации натурального объекта. Таким образом, при планировании эксперимента крайне важно оценить диапазон длин и высот натурального волнения и то, насколько будут отличаться характеристики таких волн, определенные по линейной и нелинейной теориям. Данное обстоятельство определяет актуальность темы работы.

Значительная часть украинского сектора акватории Черного моря имеет глубину менее 100 м, при этом средняя глубина моря превышает 1200 м. В Черном море период ветровых волн, как правило, не превышает 9 с, высота волн (кроме самых крупных штормовых) не превышает 6 м. Длина такой волны в условиях глубокой воды $\lambda = 126.5$ м, крутизна $\frac{H}{\lambda} = \frac{1}{21}$. Волны зыби в Черном море длиннопериодные – $\tau = 13 \div 15$ с, зимой до 17 с. Высоты волн зыби рекомендовано определять из соотношения $\frac{H}{\lambda} = \frac{1}{30} \div \frac{1}{50}$ или по формуле Циммермана $H = 0.17\lambda^{\frac{3}{4}}$ для развившихся волн длинной зыби.

Для глубоководной акватории при $\tau = 13$ с получается, что длина волны $\lambda = 264$ м, высота волны $H = 8.8 \div 5.28$, по формуле Циммермана $H = 11.13$ м, т.е. $\frac{H}{\lambda} = \frac{1}{24}$. При $\tau = 15$ с эти величины равны соответственно: $\lambda = 351$ м, высота волны $H = 11.7 \div 7.02$, по формуле Циммермана $H = 13.79$ м, т.е. $\frac{H}{\lambda} = \frac{1}{25}$.

В мелководной зоне ($h_{кр} < h < 0.5\lambda$, h – глубина акватории) меняется профиль волны (заостряются вершины, становятся более пологими подошвы). Крупные волны уменьшаются, мелкие увеличиваются по длине и высоте [10; 11]. В то же время средние периоды и распределения периодов ветрового волнения при переходе на мелководье почти не изменяются (статистические данные) [3]. По мере уменьшения относительной глубины высота волн вначале уменьшается, затем возрастает; длина волн уменьшается.

Разрушение волн начинается при $h_{кр} = 2H$, где H – высота волны. Чем меньше исходная крутизна волн глубокой воды, тем больше возрастает их высота и на меньшей относительной глубине начинается их разрушение.

Так, при $\tau = 13$ с наиболее пологая волна начинает разрушаться на глубине $h_{кр} = 10.56$ м, наиболее крутая – на глубине $h_{кр} = 22.26$ м; при $\tau = 15$ с эти глубины соответственно 14.04 м и 27.58 м.

При глубине акватории $0.5\lambda > h > h_{кр}$ в расчетах используется теория нелинейных волн конечной амплитуды. В данной работе – теория Стокса 5 порядка [12]. Для очень малых глубин ($h < 0.1\lambda$) применяется теория кноидальных волн.

Применимость различных теорий волнообразования также можно оценить по значениям числа Урселла [3]:

$$- N_{URS} = \frac{H\lambda^2}{h^3} < 10 \text{ – теория Стокса;}$$

$$- N_{URS} = \frac{H\lambda^2}{h^3} > 26 \text{ – кноидальная теория.}$$

В промежутке применимы обе теории за исключением случаев, когда при тех же условиях можно использовать линейную теорию.

По другим источникам, кноидальная теория должна применяться при $N_{URS} > 40$ [10].

Как будет показано ниже, очевидное отличие волны конечной амплитуды от волны малой амплитуды – более высокий и острый гребень. Таким образом, максимальное давление в жидкости у вершины волны конечной амплитуды будет больше, чем у волны малой амплитуды

при одинаковой относительной высоте волн. Другие характеристики профиля требуют детального анализа. При этом следует учесть, что в расчетах ходкости и качки понятие «мелководье» связывают с соотношением глубины водоема и осадки судна.

Рассмотрим волнение в акватории глубины h . Система координат и обозначение параметров волны показаны на рис. 1.

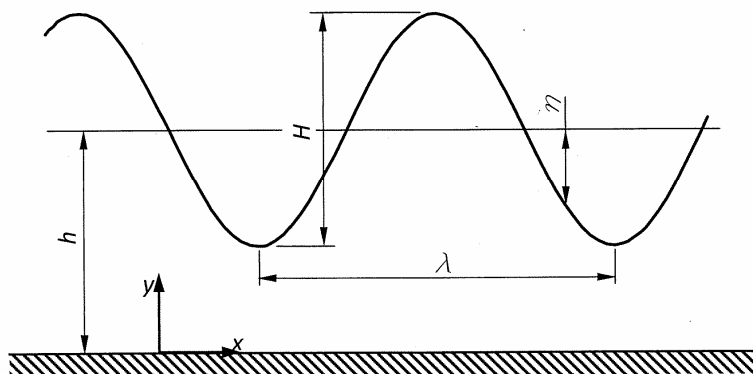


Рис. 1. Система координат и характеристики волнения

Для волны малой амплитуды (линейная теория или теория Эри) с длиной λ , высотой H и периодом τ уравнение волнового профиля

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t), \quad (1)$$

где волновое число $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ и круговая частота волнения $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$ связаны выражением

$$\omega^2 = gkth(kh). \quad (2)$$

Скорость распространения волны

$$c = \frac{\omega}{k}. \quad (3)$$

Согласно теории Стокса пятого порядка для волны конечной амплитуды с волновым числом k , высотой H и круговой частотой ω_c уравнение волнового профиля

$$\eta = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^5 F_n \cos(n(kx - \omega_c t)), \quad (4)$$

где F_n – параметры формы и высоты волнения, зависящие от kh [12].

Соотношение между круговой частотой и волновым числом

$$\omega_c^2 = gk(1 + a^2C_1 + a^4C_2)h(kh), \quad (5)$$

где a – параметр высоты волны,

C_1, C_2 – параметры частоты волны, зависящие от $\frac{h}{\lambda}$ [12].

Скорость распространения волны

$$c = \left[\frac{g}{k} (1 + a^2C_1 + a^4C_2)h(kh) \right]^{0.5}. \quad (6)$$

Для кноидальной волны с волновым числом k_K , высотой H и круговой частотой ω_K уравнение волнового профиля

$$\eta = \eta_{\min} + Hcn^2((k_Kx - \omega_Kt), m), \quad (7)$$

где η_{\min} – отклонение, соответствующее подошве волны;

cn – эллиптическая функция Якоби с модулем m ($0 \leq m \leq 1$);

$$mK^2 = \frac{3}{16} \frac{H\lambda^2}{h^3};$$

K – полный эллиптический интеграл, зависящий от m .

Период кноидальных волн равен $2K$, т.е.

$$k_K = \frac{2K}{\lambda} \text{ – волновое число;}$$

$$\omega_K = \frac{2K}{T} \text{ – круговая частота волнения.}$$

Соотношение между круговой частотой и волновым числом

$$\omega_K^2 = ghk_K^2 \left[1 + \frac{H}{mh} \left(\frac{1}{2} - \frac{E}{K} \right) \right]^2, \quad (8)$$

где E – полный эллиптический интеграл второго рода, зависящий от m ;

$$\eta_{\min} = H \frac{K(1-m) - E}{mK}.$$

Скорость распространения кноидальной волны определяется формулой, аналогичной (3).

Рассмотрим в качестве примера назначение характеристик волнения для балкера «Зоя Космодемьянская» (форма корпуса которого типична для крупнотоннажных танкеров и балкеров) при его движении в Одесском заливе. Главные размерения судна: $L = 201.6$ м, $B = 31.8$ м, $T = 11.73$ м. Тогда, следуя обычной практике опытового бассейна

ОНМУ, расчетный диапазон длин волн принимается от $\lambda_{\min} = 2B$ до $\lambda_{\max} = 2L$, для мелководья относительные глубины акватории $\frac{h}{T} = 1.3$, $\frac{h}{T} = 1.5$, $\frac{h}{T} = 2.0$. Значения длин волн глубокой воды и глубин мелководной акватории приведены в таблице. Там же даны значения длин и относительных высот волн, которые получаются при переходе на мелководье заданной глубины.

Характеристики волн при переходе с глубокой воды на мелководье

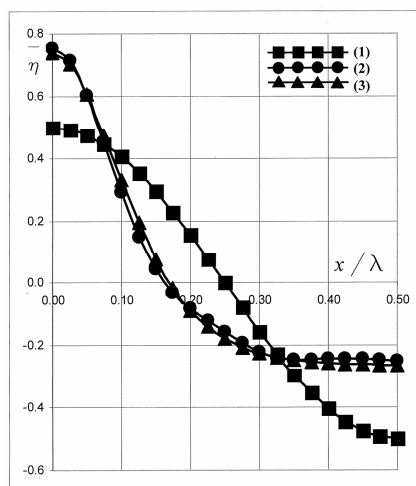
$H_{2l} = \frac{\lambda_{2l}}{40}$									
$\lambda_{2l} \rightarrow$ м	63.6			201.6			403.2		
$h \downarrow$ м	$\frac{h}{\lambda_{2l}}$	λ_m	$\frac{H_m}{\lambda_m}$	$\frac{h}{\lambda_{2l}}$	λ_m	$\frac{H_m}{\lambda_m}$	$\frac{h}{\lambda_{2l}}$	λ_m	$\frac{H_m}{\lambda_m}$
15.25	0.24	57.3	$\frac{1}{41}$	0.076	125.0	$\frac{1}{26}$	0.038	197.6	$\frac{1}{18}$
17.60	0.277	58.0	$\frac{1}{40}$	0.087	133.1	$\frac{1}{28}$	0.044	205.6	$\frac{1}{19}$
23.46	0.369	60.5	$\frac{1}{39}$	0.116	145.2	$\frac{1}{31}$	0.058	221.8	$\frac{1}{22}$

Для вычисления характеристик волн использовался написанный на интерпретируемом объектно-ориентированном языке программирования Python класс и пользовательское приложение, реализующее алгоритм расчета характеристик волнения рассмотренными методами.

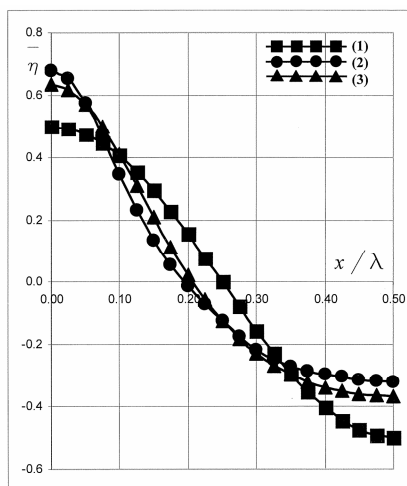
Ниже в качестве примера (рис. 2 и 3) приведены результаты расчетов по различным теориям ординат волн $\bar{\eta} = \frac{\eta}{H/2}$ в зависимости от

отношения $\frac{x}{\lambda}$ при различных глубинах акватории, длинах и относительных высотах волн.

Определим теперь характеристики волнения заданной длины и крутизны, исходя из заданной глубины акватории. Примем в качестве расчетных значения глубин $h_1 = 17$ м, $h_2 = 23$ м (соответственно – глубины рейдовых стоянок Одесского морского торгового порта по данным «Известия мореплавателям» 2012 года).

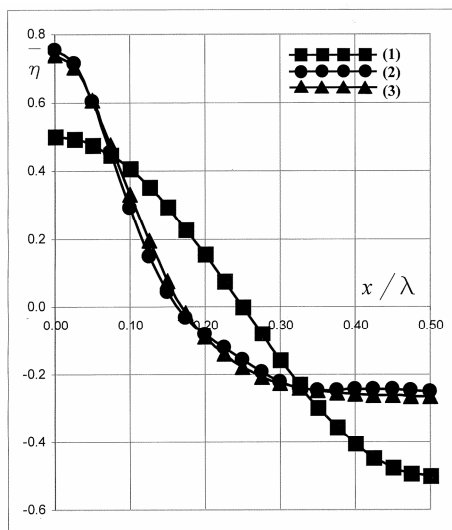


Глубина акватории $h = 17.6$ м,
число Урселла $N_{URS} = 75.1$

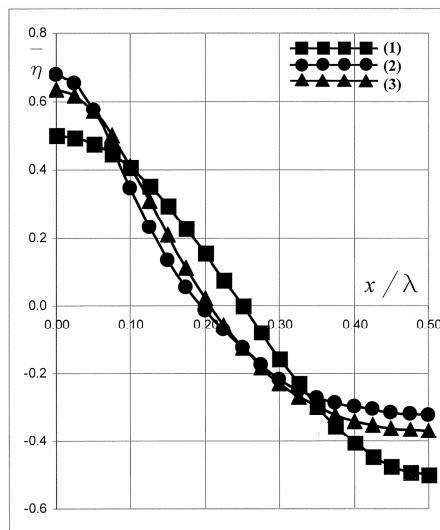


Глубина акватории $h = 23.46$ м,
число Урселла $N_{URS} = 31.7$

Рис. 2. Относительные ординаты профиля волны длины $\lambda = 201.6$
крутизны $\frac{H}{\lambda} = \frac{1}{20}$: 1 – линейная теория;
2 – теория Стокса;
3 – кноидальная теория



Глубина акватории $h = 17.6$ м,
число Урселла $N_{URS} = 37.6$



Глубина акватории $h = 23.46$ м,
число Урселла $N_{URS} = 15.9$

Рис. 3. Относительные ординаты профиля волны
длины $\lambda = 201.6$ крутизны $\frac{H}{\lambda} = \frac{1}{40}$: 1 – линейная теория;
2 – теория Стокса; 3 – кноидальная теория

Для этих глубин влияние мелководья не должно сказываться при длинах волн, меньших 34 м и 46 м соответственно, а волнение длиной более 170 м и 230 м (если оно может существовать) должно рассматриваться в рамках теории кноидальных волн.

Ниже приведены результаты расчетов по различным теориям в зависимости от длины волны λ ($\lambda = 34 \div 208$ м), высоты которых $H = \frac{1}{40} \lambda$, следующих характеристик:

- относительных высот гребня волны $\bar{\eta}_{ep} = \frac{\eta_{ep}}{H/2}$ (рис. 4);
- скоростей распространения волны c , м/с (рис. 5);
- относительного объема волны на единицу длины гребня, находящегося выше уровня подошвы волны Стокса $\bar{Q} = \frac{Q}{H\lambda}$ (рис. 6);
- относительной скорости переноса объема волны $\frac{\bar{Q}}{\tau}$ (рис. 7).

Полученные результаты показывают, что;

- практически во всем выбранном диапазоне длин волн и глубин максимальное значение высоты гребня волны получается по теории Стокса;

- профили коротких волн, определенные по всем трем теориям, практически совпадают;

- для самых длинных волн относительные высоты гребней, определенные по теории Стокса и кноидальной, практически совпадают на глубине $h_1 = 17$ м; на глубине $h_2 = 23$ м гребни волн Стокса выше гребней кноидальных волн на 5-6 % во всем диапазоне длин волн;

- скорости распространения кноидальных волн во всем диапазоне длин волн превышают скорости, определенные по другим теориям;

- относительные объемы волн конечной амплитуды в области длинных волн меньше, чем у волны Эри, в области коротких волн объемы по трем теориям практически одинаковы; отличие объемов на глубине $h_1 = 17$ м больше, чем на глубине $h_2 = 23$ м; если определять объемы волн для каждой из волн относительно ее подошвы а не относительно общего уровня (подошвы волны Стокса), различие будет еще больше;

- скорости переноса относительных объемов волн Эри и Стокса практически совпадают во всем диапазоне длин волн; скорости переноса относительных объемов кноидальных волн в области длинных волн существенно превышают соответствующие значения по остальным теориям;

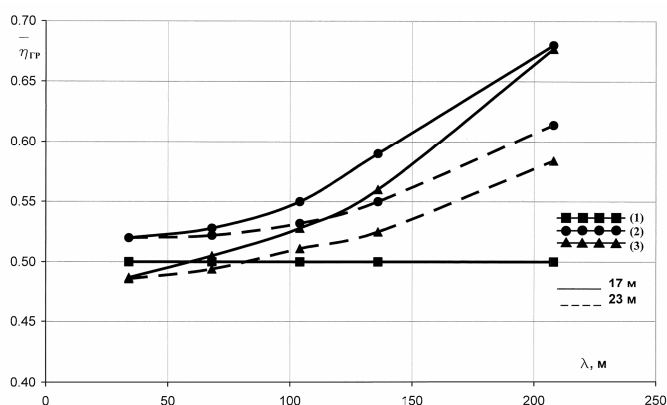


Рис. 4. Относительная высота гребня волны

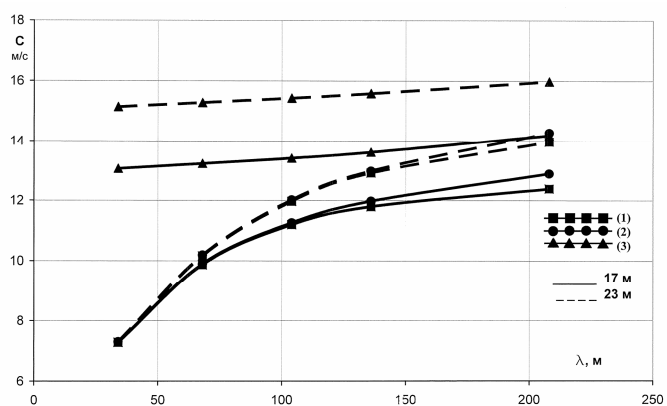


Рис. 5. Скорость распространения волны

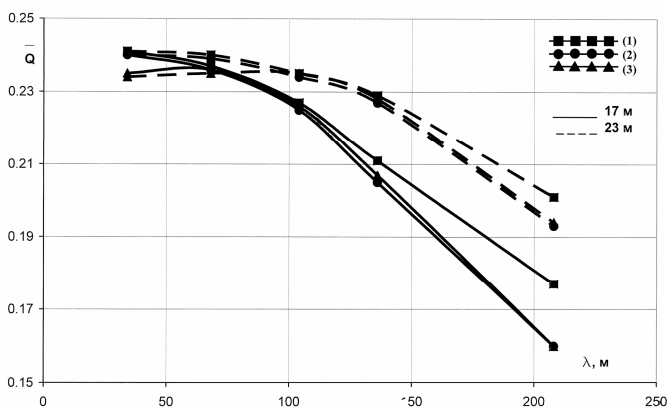


Рис. 6. Относительный объем волны на единицу длины гребня

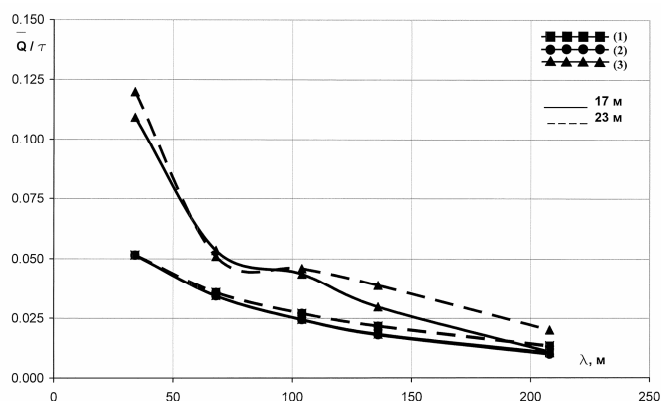


Рис. 7. Относительная скорость переноса объема волны

- в области коротких волн периоды кноидальных волн по расчету существенно меньше, чем периоды волн, вычисленные по другим теориям (это связано с определением эллиптических функций, входящих в уравнение волнового профиля), соответственно скорости переноса объемов существенно возрастают; в этой области кноидальная теория неприменима.

Выводы

1. При назначении в эксперименте расчетных параметров волнения для мелководья необходимо проверить возможность существования волн заданной длины и высоты при данной глубине.

2. При моделировании взаимодействия судна с относительно крутыми ($H = \frac{1}{30} \lambda$) волнами, длина которых сопоставима с длиной судна, в методику проведения опытов, принятую в ОНМУ, не требуется вносить изменений.

3. При моделировании взаимодействия судна с волнами, длина которых превышает длину судна, необходимо вначале определить профиль волны конечной амплитуды. Затем в зависимости от поставленной задачи принять, какая характеристика волны будет смоделирована при данной длине – высота или объем над уровнем подошвы.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сердюченко А.Н. Динамика морских волн и судна в шторме с учетом нелинейных эффектов // Гидромеханика. Межведомственный сб. научн. тр. – Вып. 72. – К.: Институт гидромеханики НАН Украины, 1998. – С. 112-134.

2. Мореходность судов и средств океанотехники. Методы оценки: Монография / Под ред. И.К. Бородая. – СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2013. – 256 с.
3. Лопатухин Л.И. Ветровое волнение: Учебн. пособие. – СПб.: ВВМ, 2012. – 165 с.
4. Исследование режима волнения в 10-мильной прибрежной зоне Черного моря от Дунайской Прорвы до порта Новороссийск, включая Керченский пролив: Научно-технический отчет. – СПб.: СПГУ, 2008. – 172 с.
5. Кириллов В.Н., Демидюк А.В., Тонюк В.И. Экспериментальная установка для исследования гидродинамических характеристик продольной качки моделей судов // Вісник ОДМУ. – Одеса: Вид-во ОГМУ, 1998. – № 1. – С. 90-93.
6. Ефремова Н.В. Экспериментальное исследование возмущающих сил и моментов модели СПБУ на регулярном волнении. // Вісник ОНМУ. – Одеса: Вид-во ОНМУ, 2003. – №11. – С. 78-89.
7. Ефремова Н.В. Экспериментальное исследование гидродинамических характеристик качки модели СПБУ методом вынужденных колебаний // Вісник ОНМУ. – Одеса: Вид-во ОНМУ, 2003. – № 12. – С. 37-45.
8. Ефремова Н.В. Экспериментальное исследование кинематических характеристик качки модели СПБУ на регулярном и импульсном волнении // Вісник ОНМУ. – Одеса: Вид-во ОНМУ, 2004. – № 14. – С. 50-57.
9. Федорова Е.Ю. Силовое воздействие прогрессивных волн конечной амплитуды на горизонтальный подводный волнолом // Вісник ОНМУ. – Одеса: Вид-во ОНМУ, 2003. – № 11. – С. 139-152.
10. Мунк В. Теория одиночных волн и ее применение к зоне прибоя // Основы предсказания ветровых волн, зыби и прибоя: Сб. статей. – М.: ИЛ, 1951. – С. 403-409.
11. Fenton J. D. The cnoidal theory of water waves // *Developments In Offshore Engineering: Wave Phenomena And Offshore Topics* / Herbich J.B., Editor. – Gulf Publishing Company, 1998, – P. 55-100.
12. Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа. – Л.: Судостроение, 1986. – 288 с.

Стаття надійшла до редакції 30.10.2015