

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Кафедра «Океанотехника и кораблестроение»

И.Н. Морева

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ. КАЧКА СУДОВ

Учебно-методическое пособие
к выполнению лабораторных работ
по дисциплине для студентов направления
26.03.02 «Кораблестроение, океанотехника
и системотехника объектов морской инфраструктуры»
и специальности
26.05.01 «Проектирование и постройка кораблей, судов
и объектов океанотехники»
всех форм обучения

Севастополь
СевГУ
2020

УДК 629.5.017.2(076.5)
ББК 39.42-01я73
М79

Р е ц е н з е н т:

Т.Л. Чемакина – кандидат технических наук, доцент

Морева И.Н.

М79 Теория корабля. Качка судов : учебно-методическое пособие к выполнению лабораторных работ по дисциплине для студентов направления 26.03.02 «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» и специальности 26.05.01 «Проектирование и постройка кораблей, судов и объектов океанотехники» всех форм обучения / И.Н. Морева ; Министерство науки и высшего образования РФ, Севастопольский государственный университет. – Севастополь: СевГУ, 2020. – 55 с. – Текст : электронный.

Целью учебно-методического пособия является оказание помощи студентам в выполнении лабораторных занятий по дисциплине «Теория корабля. Качка судов».

УДК 629.5.017.2(076.5)
ББК 39.42-01я73

Учебно-методическое пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Океанотехника и кораблестроение», протокол № 8 от 26 мая 2020 г.

© Морева И.Н., 2020
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	4
1. Средства и методы измерения характеристик морского волнения и качки судов.	5
2. Экспериментальное определение момента инерции массы судна и его модели.....	13
3. Экспериментальное определение присоединенного момента инерции и коэффициента демпфирования при бортовой качке корабля.....	20
4. Определение редуционных коэффициентов к главной части возмущающих сил при бортовой качке судов	28
5. Использование решений гидродинамической теории качки в расчетах бортовой качки судов и плавучих сооружений.....	33
6. Расчет продольной качки судов на нерегулярном волнении	41
Библиографический список.....	49
Приложение А.....	51
Приложение Б	53

ПРЕДИСЛОВИЕ

Раздел дисциплины «Теория корабля» посвящен изучению качки судов на морском волнении. При качке судно совершает сложное движение, которое не может быть строго описано математически при современном состоянии науки - гидромеханики тяжелой вязкой жидкости. Практически важные результаты достигнуты благодаря широкому использованию решений гидродинамической теории качки совместно с данными физического моделирования качки. Цикл лабораторных работ, представленный в учебно-методическом пособии, позволяет ознакомиться с основными техническими средствами и методикой обработки экспериментальных данных, используемых в исследованиях и практических расчетах качки судов, а также с основополагающими результатами гидродинамической теории качки. Использование решений гидродинамической теории требует привлечения современной компьютерной техники и специального программного обеспечения. Выбор тематики работ отчасти обусловлен возможностями малого опытового бассейна кафедры океанотехники и кораблестроения.

1. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ И КАЧКИ СУДОВ

Цель работы: работа преследует цель - дать представление о принципах измерения волнения и качки, о технических средствах, методике измерений и обработки результатов с использованием элементов компьютерных технологий.

Содержание работы:

1. Ознакомление со средствами измерения ординат процессов волнения и качки.
2. Предварительная обработка реализаций волнения и качки. Формирование выборок высот волн и амплитуд качки
3. Оценка вероятностных характеристик распределений и выбор гипотетического закона распределения, наилучшего в смысле критерия Колмогорова - Смирнова при заданном уровне значимости.
4. Оценка высоты волн 3% обеспеченности и силы волнения по шкале ГУТМС-53.
5. Оценка амплитуды качки 3% обеспеченности.

Приборы и оборудование:

1. Малый опытовый бассейн с волнопродуктором и волногасителем.
2. Волнографы морские.
3. Волнограф поплавковый (для измерения волнения в опытовом бассейне).
4. Гирикенографы.
5. Регистрирующая аппаратура.
6. Устройства питания и управления.
7. Компьютерный зал (9 мест).

Программное обеспечение – программа BUBSORT.

ВВЕДЕНИЕ

1 Волны ветровые и зыбь. Термины и определения

В соответствии с ГОСТ 18455-73 волны на море подразделяется:

- на ветровые волны - волны, вызванные ветром и находящиеся под его воздействием;
- зыбь - волны, вызванные ветром, но не находящиеся под его воздействием;
- смешанное волнение - наложение ветровых волн и зыби;
- мертвую зыбь - волнение в отсутствие ветра.

Различаются ветровые волны капиллярные (поддерживаемые силами поверхностного натяжения, с длиной волн до 0,004 м), капиллярно-гравитационные (поддерживаемые как силами поверхностного натяжения,

так и гравитационными силами, - с длиной до 0,060 м) и гравитационные волны - с длиной более 0,1 м.

Волны на море - трехмерные, т.е. являющиеся результатом наложения множества элементарных двумерных волн, бегущих в разных направлениях. В качестве меры трехмерности волнения используется коэффициент трехмерности, представляющий собою отношение средней длины видимых гребней волн к средней длине видимых волн. По ГОСТ 18455-73 под длиной гребня индивидуальной видимой волны понимается расстояние между соседними подошвами, а под длиной волны - между соседними вершинами. При коэффициенте трехмерности менее трех-четырех волнение считается трехмерным.

2 Волны. Методы и средства измерения

Методы измерения волнения подразделяются на контактные (реализуются с помощью контактных волнографов) и неконтактные (реализуются стереофотографированием взволнованной поверхности моря с самолетов, а также с помощью акустических и электромагнитных зондирующих устройств-волнографов - с самолетов и космических аппаратов).

В целях исследования и предвычисления качки судов и плавучих сооружений используются в основном контактные волнографы и, в редких случаях, результаты стереосъемок моря с самолетов.

Первичные результаты измерений с помощью волнографов представляют собой реализации, т.е. развертку во времени, мгновенного возвышения поверхности воды (уровня) на некоторой вертикали в море относительно условного базового уровня. Волнограф представляет собой некоторый датчик-преобразователь мгновенного уровня воды в сигнал, который может быть зарегистрирован современными приборами-регистраторами.

Основные требования к датчикам-преобразователям - достаточная для практических целей точность, помехоустойчивость и достаточно широкий диапазон рабочих внешних условий.

На небольших глубинах применяется волномерная вежа - забитая в грунт и раскрепленная анкерными оттяжками трубчатая стойка, выступающая над средним уровнем воды более, чем на половину ожидаемой высоты наибольших волн. В простейшем случае регистрация волнения может быть осуществлена путем киносъемки выступающей над водой части вежи. Более удобные для дальнейшей обработки данные получают с помощью специального фоторегистратора, реализующего непрерывную съемку вежи через щелевой объектив. Для облегчения последующей обработки киноленты вежа окрашивается кольцами двух контрастных цветов высотой по 0,1 м. Регистрация волнения с помощью вежи легко автоматизируется, например, путем применения датчика-преобразователя, представляющего собой отрезок тонкой проволоки из материала с высоким сопротивлением электрическому току (безокисный нихром),

подвешенного через изолятор к кронштейну на верхнем торце вехи и частично погруженного в воду. Электрическое сопротивление погруженной в воду части проволоки мало (вода как бы "замыкает" эту часть), поэтому общее сопротивление проволоки равно сопротивлению её надводной части и, следовательно, измеряя это сопротивление, меняющееся вместе с изменением положения поверхности волны, можно измерить и ординату волны (влияние поляризации электрода исключается применением переменного тока повышенной частоты). Именно так работает волнограф ГМ-61, выпускавшийся заводами гидрометеоприборов СССР.

На больших глубинах базовый уровень, относительно которого измеряется изменение уровня поверхности волны, приходится имитировать. Используется то обстоятельство, что волновое движение интенсивно затухает с глубиной, и на глубинах, больших половины длины волны, волновое движение частиц жидкости практически отсутствует, поэтому давление в воде на такой глубине уже не зависит от наличия волн на поверхности моря и практически равно статическому.

Подобный прием измерения волн на глубокой воде реализован вехой Фруда - водоизмещающей трубчатой стойкой, плавающей вертикально в полупогруженном состоянии на поверхности моря и снабженной в нижней части балластом и соосным стойке диском большого диаметра, плоскость которого перпендикулярна оси стойки. Веха забалластирована так, что при отсутствии волнения над водой выступает часть вехи, большая чем полувысота ожидаемых волн. Пробегаящие волны создают вертикальную возмущающую силу, примерно равную силе веса воды в объеме дополнительно вошедшего в воду объема вехи. Так как диаметр вехи мал, то и сила эта мала. Возмущающая сила приводит к появлению вертикального ускорения вехи, настолько малого, что оно практически не может привести к смещению вехи из-за огромной присоединенной массы диска.

Таким образом, веха может считаться неподвижной в отношении вертикального смещения. Так имитируется базовый уровень, относительно которого и измеряется мгновенное положение уровня поверхности волны.

Собственно измерение уровня может быть выполнено так же, как и с помощью вехи, установленной неподвижно на грунте.

Иной прием реализуется в поплавковых волнографах. Он основан на измерении изменения положения по высоте над базовым уровнем плавающего на взволнованной поверхности воды плоского поплавка (буя) большого диаметра, который практически точно отслеживает положение поверхности воды, поднимаясь или опускаясь вместе с ней. За базовый уровень снова принимается уровень, лежащий на глубинах, больших половины наибольшей длины ожидаемых волн. Измерение перемещения буя относительно этих слоев воды выполняется с помощью датчика-преобразователя, подвешенного на кабель-тросе соответствующей длины.

Известны поплавковые волнографы с вертушечными датчиками перемещения и датчиками давления.

В поплавковых вертушечных волнографах вертикальное перемещение буя измеряется как перемещение датчика-преобразователя, подвешенного на кабель-тросе к бую, относительно неподвижной на большой глубине воды. Датчик перемещения представляет собою устройство, напоминающее вертушечный лаг, только с вертикальной осью. Перемещение датчика относительно воды измеряется углом поворота вертушки - небольшого гребного винта. Угол поворота измеряется относительно направляющего кольца-насадки. Вертушка-винт вращается внутри насадки на опорах с пренебрежимо малым трением, т.е. как бы с относительной поступью нулевого момента. Вращение же самой насадки в воде предупреждается крестообразным стабилизатором на её внешней поверхности.

Полагая, что сведения из курса лекций по судовым движителям не исчезли полностью из памяти, можем написать:

- в режиме нулевого крутящего момента относительная поступь

$$J_2 = J|_{K_Q=0} = \frac{v_A}{nD} = const ,$$

т.е. постоянна.

Следовательно,

$$v_A = J_2 nD .$$

Частота вращения связана с углом поворота вертушки соотношением

$$n = \frac{1}{2\pi} \frac{dj}{dt} ,$$

где $\frac{dj}{dt}$ - угловая скорость вертушки, так что путь вертушки связан с углом её поворота соотношением

$$s = \int v_A dt = J_2 D \int n dt = \frac{J_2 D}{2\pi} \int \frac{dj}{dt} dt = \frac{J_2 D}{2\pi} [j(t) - j(0)] .$$

Таким образом, измеряя угол поворота вертушки, можно определить её перемещение вдоль оси относительно воды или, что то же, вертикальное перемещение буя и, следовательно, изменение ординаты волны.

В поплавковых волнографах с датчиками давления перемещение по вертикали на dz датчика, распложенного в неподвижных слоях воды, вызывает изменение давления на величину

$$dp = \rho g dz .$$

Остается лишь измерить это изменение давления. Некоторым препятствием на этом пути является то, что изменение давления от волнения составляет малую долю от статического давления на большой глубине в месте расположения датчика. В поплавковых волнографах ГМ-16, ГМ-32, серийно выпускавшихся в СССР заводами гидрометеоприборов, эта проблема остроумно решена путем использованием компенсатора давления, автоматически "отсекающего" среднее давление, так что датчик измеряет только изменение давления, вызванное волнением.

Судовые волнографы, предназначенные для измерения волнения непосредственно с борта судна, используют те же датчики-преобразователи, но требуют исключения влияния собственного движения судна на показания волнографа. Один из путей решения этой проблемы реализован в волнографах ГМ-62.

3 Качка корабля. Методы и средства измерения

Положение корабля в пространстве как твердого тела описывается шестью координатами. Обычно используются три линейных координаты, задающие положение центра массы корабля (в левой Декартовой прямоугольной системе координат) и три угловых координаты, задающие мгновенное положение связанной с кораблем системы координат относительно её начального положения (три Эйлера или Карданова угла). Под качкой корабля понимается изменение каждой их шести координат, носящее колебательный характер. Это продольно-горизонтальная, вертикальная и поперечно-горизонтальная качка, бортовая, килевая качка и рыскание.

Измерение линейных видов качки в натуральных условиях представляет значительные трудности и выполняется в результате двукратного интегрирования компонентов линейных ускорений, измеряемых датчиками ускорений, ориентация которых в пространстве осуществляется за счет установки датчиков на гиростабилизированной платформе.

Измерение бортовой и килевой качки сводится к измерению углов наклона корабля относительно истинной вертикали, положение которой в пространстве хорошо имитируется гиromаятником (гировертикалью), представляющей собой трехстепенной гироскоп, один из концов оси вращения которого подгружен тяжелой массой. Технически съем сигнала, связанного с углом крена или углом дифферента, осуществляется измерением углов, соответственно, между наружным кольцом Карданова подвеса и связанным с кораблем основанием гировертикали, а также угла между внешним и внутренним кольцами Карданова подвеса. Если цапфы наружного кольца Карданова подвеса расположены параллельно продольной оси корабля, то угол его поворота относительно основания есть угол крена корабля φ . При этом угол поворота внешнего кольца относительно внутреннего есть $\varphi/2 - \gamma$, где γ - угол между продольной осью корабля и горизонтом, т.е. угол дифферента.

В большинстве практических задач представляет наибольший интерес бортовая качка, поскольку её амплитуды могут достигать опасных значений.

Следует заметить, что регистрация бортовой качки сравнительно просто реализуется путем непрерывной фотосъемки видимой линии горизонта фоторегистратором, установленным на судне так, что его оптическая ось параллельна основной плоскости судна и перпендикулярна его продольной оси. Фоторегистратор представляет собой модифицирован-

ный фотоаппарат, в котором кадровое окно закрыто шторкой с узкой вертикальной щелью, а покадровая протяжка пленки заменена на непрерывную с постоянной скоростью протяжки.

Следует заметить, что использование для регистрации бортовой качки короткопериодных маятников (типа судовых кренометров) не имеет смысла, так как из-за близости периода их собственных колебаний, периода собственных колебаний судна и периодов волн они совершают при качке корабля в море сложные колебательные движения, недопустимо искажающие оценку угла крена.

4 Первичная обработка результатов измерений процессов волнения и качки

4.1 Волнение

Информация о морском волнении, получаемая с помощью волнографа, установленного на некоторой вертикали в море, представляет собой реализацию случайного процесса изменения ординаты поверхности волны во времени. В практических расчетах для идентификации интенсивности процесса используются некоторые неслучайные числовые характеристики случайного процесса. Их применение основано на допущении о стационарности процесса, а сами характеристики представляют собой оценки значений амплитуд (размахов) колебаний, превышаемых в заданной выборке амплитуд (размахов) с некоторой произвольно выбранной, но канонизированной, вероятностью (обеспеченностью). В Украине, как и ранее в СССР, волнение измеряется высотой волн 3%-й обеспеченности (шкала ГУГМС-53). ВМО - всемирная метеорологическая организация – предписывает измерять волнение средней высотой $\frac{1}{3}$ самых высоких волн. Собственно высота волн измеряется в метрах, однако для практических целей, степень волнения оценивается баллами, соответствующими некоторым интервалам высот волн, образующими шкалу степени волнения (табл. 1).

Таблица 1 - Шкала степени волнения

Степень волнения, баллы	Высоты волн, м			
	ГУГМС-53		ВМО	
	$h_{3\%}$	$h_{1/3}$	$h_{3\%}$	$h_{1/3}$
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,25	0,19	0,13	0,10
2	0,75	0,57	0,66	0,50
3	1,25	0,95	1,65	1,25
4	2,00	1,52	3,30	2,50
5	3,50	2,65	5,28	4,00
6	6,00	4,55	7,91	6,00
7	8,50	6,44	11,90	9,00
8	11,00	8,35	18,50	14,00
9	>11	>8,35	>18,5	>14

Таким образом, предварительная подготовка данных включает разделение реализации колебаний на индивидуальные колебания (волны) и последующее определение размахов или амплитуд таких колебаний.

Оценка упомянутых выше характеристик интенсивности случайного процесса выполняется с использованием реализации случайного процесса - т.е. регистрации ординаты процесса во времени. Длительность регистрации должна быть возможно большей, однако не должна выходить за пределы интервала стационарности процесса.

Как уже сказано, предварительная обработка сводится к разбиению реализации процесса на отдельные (индивидуальные) колебания по оси времени. "Колебанием" считается отрезок процесса между двумя последовательными переходами через нуль в одном и том же направлении. Каждому такому i -колебанию соответствуют два числа - i -размах (высота) h_i или "амплитуда" (положительная или отрицательная) a_i и i -период τ_i которые и используются в дальнейшей обработке. Пусть всего колебаний оказалось N ($i=1...N$). Тогда N – объем выборки.

Для получения статистически устойчивых результатов объем выборки должен исчисляться сотнями колебаний. Это обстоятельство вносит известные затруднения при обработке вручную, поэтому дальнейшая обработка данных ведется на компьютере с использованием соответствующего программного обеспечения, например, программы BUBSORT.

4.2 Качка

Качка, аналогично волнению, рассматривается как случайный стационарный процесс.

Интенсивность качки измеряется аналогично волнению, с тем исключением, что вместо размахов качки рассматриваются амплитуды качки. По РД 5.1003-80 качка измеряется амплитудами (средней и 3%-й обеспеченности) и средним периодом крупных колебаний (удвоенным периодом следования нулей процесса качки). Эти же величины определяются и во время натурных мореходных испытаний.

Предварительная подготовка данных аналогична таковой при обработке волнограмм.

5 Программа BUBSORT и её использование

Программа BUBSORT предназначена для обработки вариационных рядов, т. е. выборок случайных величин. Программа упорядочивает вариационный ряд объема n и вычисляет статистику Колмогорова - Смирнова $K(n, \alpha)$ при заданном уровне значимости α (уровень значимости - это вероятность того, что гипотеза о принадлежности заданной выборки к некоторому закону распределения отвергается ошибочно, тогда как она верна). Уровень значимости задается, и обычно принимается $\alpha = 0,05$.

Программа аппроксимирует функцию распределения значений вариационного ряда известными гипотетическими законами распределения, сохраняя эмпирическое среднее значение и эмпирическое среднеквадратическое отклонение, и находит элемент ряда, наиболее уклоняющийся от значения, соответствующего гипотетическому закону распределения, а также величину этого отклонения.

Программа оперирует с законами распределения, наиболее часто используемыми для описания распределений параметров волнения, ветра и качки (Релея, Фреше, Гумбеля), а также логнормальным, нормальным и экспоненциальным законами.

Знание гипотетического закона распределения, удовлетворительно описывающего эмпирические распределения, важно с теоретической точки зрения, а упорядоченный вариационный ряд, выдаваемый программой на экран и принтер, позволяет легко определить значения исследуемой величины заданной обеспеченности.

6 Задание (индивидуальное)

Задана выборка высот волн h . Объем выборки $n = 200$.

Определить высоту волн 3%-й обеспеченности, а также указать гипотетический закон распределения, от которого заданная выборка высот уклоняется менее всего. Использовать статистику Колмогорова - Смирнова при уровне значимости 0,05.

Отчет по работе должен содержать введение, постановку задачи, таблицу исходных данных и протокол расчета по программе BUBSORT (Руководство пользователя прилагается).

Аналогично выполняется обработка данных по бортовой качке корабля (исходные данные – по индивидуальному заданию).

Контрольные вопросы

1. В чем состоит принцип работы вехи Фруда?
2. Объясните принцип действия поплавкового волнографа с датчиком давления и опишите кратко его устройство (на примере волнографа ГМ-16 или ГМ-32).
3. На какую глубину должен быть погружен датчик поплавкового волнографа, если средняя длина ожидаемых волн равна 100 м?
4. Как связаны Кардановы углы, реализуемые Кардановым подвесом, с углами крена и дифферента, используемыми в статике корабля, если ось наружного кольца подвеса параллельна продольной оси корабля?
5. Как можно измерить ординаты линейных видов качки корабля?

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МАССЫ СУДНА И ЕГО МОДЕЛИ

Цель работы: освоение практических способов экспериментального определения моментов инерции массы судна (на модели и в натуре).

Содержание:

1. Ознакомление с основными понятиями о моментах инерции масс судна и способами их определения
2. Ознакомление со стендом для динамической тарировки моделей.
3. Экспериментальное определение момента инерции массы судна относительно центральной продольной оси.

Приборы и оборудование

1. Стенд для динамической тарировки моделей
2. Модели судов с устройством для динамической тарировки
3. Кренометр
4. Миллисекундомер
5. Масштабная линейка
6. Компьютерный зал

Программное обеспечение - MATHCAD.

ВВЕДЕНИЕ

При качке корабля как твердого тела его движение по всем координатам ("степеням свободы") описывается системой шести дифференциальных уравнений.

В дифференциальные уравнения движения входят характеристики массы судна и её распределения (компоненты тензора инерции). В обычной связанной системе координат статики (левая Декартова прямоугольная, с началом в пересечении плоскостей основной, диаметральной и плоскости мидельшпангоута) эти характеристики имеют вид

$$J_{YY} = \int_M y^2 dm; \quad J_{YZ} = \int_M yz dm; \quad J_{ZZ} = \int_M z^2 dm. \quad (1)$$

Компоненты тензора инерции встречаются в уравнениях движения либо порознь, либо в виде сумм [9]

$$J_Z = J_{XX} + J_{YY}; \quad J_X = J_{YY} + J_{ZZ}; \quad J_Y = J_{ZZ} + J_{XX}, \quad (2)$$

представляющих собой моменты инерции относительно соответствующих осей координат.

В частности, в уравнении бортовой качки встречается

$$J_X = J_{YY} + J_{ZZ} = \int_M (y^2 + z^2) dm = \int_M r^2 dm \quad (3)$$

- момент инерции относительно оси Ox , или момент инерции относительно центральной продольной оси

$$J_{xG} = \int_M [(y - y_G)^2 + (z - z_G)^2] dm = J_x - (y_G^2 + z_G^2) \Delta. \quad (4)$$

Последнее выражение представляет собой теорему Штейнера, используя которую можно выполнять определение момента инерции относительно некоторой, удобной в практическом отношении, оси, а затем пересчитать его значение к оси, параллельной центральной.

Физическое моделирование бортовой качки предполагает выполнение условий подобия модели и натурного судна.

Для модели, геометрически подобной натуре, условия подобия состоят в попарном равенстве для модели и для натуре значений определяющих критериев:

$$\frac{\Delta}{rB^3}, \frac{J_{xG}}{rB^5}, \frac{z_G}{B} \cdot \frac{y_G}{B}, \quad (5)$$

причем, чтобы уменьшить влияние «масштабного эффекта вязкости» (из-за несовпадения для модели и натуре значений $\frac{\sqrt{gB^3}}{v}$) модель должна иметь такие размеры, чтобы выполнялось условие

$$\frac{\sqrt{gB^3}}{v} > 5,2 \cdot 10^5. \quad (6)$$

Как видно из формул (4, 5), для определения J_{xG} необходимо знать:

- водоизмещение модели;
- момент инерции массы относительно вспомогательной оси, параллельной оси, относительно которой необходимо определить момент инерции;
- координаты центра массы модели относительно вспомогательной оси.

Водоизмещение модели, т.е. её масса находится взвешиванием модели.

Координаты центра массы модели находятся известным способом "кренования в воздухе"; они могут быть получены в процессе подготовки модели к определению момента инерции.

Модель, для обеспечения динамической тарировки, т.е. выполнения условий подобия, снабжается устройством для изменения положения центра массы модели и момента инерции.

Момент инерции находится опытным путем, причем используются различные модификации "способа физического маятника" [7].

Устройство для динамической тарировки состоит из стойки, крестовины и кренгрузов левого и правого бортов. Стойка устанавливается на модели в диаметральной плоскости параллельно оси oz модели. По стойке, в плоскости, параллельной плоскости миделя, может перемещаться крестовина, параллельная оси ou ; крестовина несет на себе кренгрузы. Перемещение крестовины по высоте изменяет аппликату центра тяжести модели, а перемещение кренгрузов по крестовине изменяет ординату центра тяжести и момент инерции, но не изменяет положения центра тяжести модели по высоте.

Таким образом, устройство позволяет, без изменения массы модели, изменять момент инерции относительно продольной оси и координаты центра тяжести модели.

В результате тарировки обеспечивается удовлетворение условий подобия

$$\left(\frac{\Delta}{rB^3} \right)_M = \frac{\Delta}{rB^3}, \quad (7)$$

$$\left(\frac{z_G}{B} \right)_M = \frac{z_G}{B}, \quad (8)$$

$$\left(\frac{y_G}{B} \right)_M = \frac{y_G}{B}, \quad (9)$$

$$\left(\frac{J_{xG}}{rB^5} \right)_M = \frac{J_{xG}}{rB^5}. \quad (10)$$

Итак, динамическая тарировка модели состоит из следующих процедур:

1. Изменением массы модели за счет установки/снятия твердого балласта достигается обеспечение условия (7). Для взвешивания модели используются платформенные весы.

2. Модель подвешивается на опорных призмах стенда для динамической тарировки, так чтобы её центр тяжести оказался ниже оси подвеса.

Измеряется z_0 - расстояние от основной плоскости модели до оси подвеса. Используются параллелограмм и масштабная

3. Выполняется кренование модели в воздухе, для чего:

- измеряется начальный угол крена модели q' (используется кренометр);
- измеряется отстояние кренгрузов левого и правого бортов от стойки в начальном положении y_L', y_R' ; используется масштабная линейка;
- производится передвижение кренгрузов из исходного положения на один из бортов до изменения крена модели на величину около 5° ; полученный угол крена q'' измеряется;
- измеряются новые значения отстояния кренгрузов от стойки y_L'', y_R'' ;
- вычисляется значение аппликаты центра тяжести модели по формуле

$$z_G = z_0 - \frac{1}{\Delta} \frac{Q_L(y_L'' - y_L') + Q_R(y_R'' - y_R')}{\operatorname{tg} q'' - \operatorname{tg} q'}. \quad (11)$$

Опыт повторяется при других возвышениях крестовины с кренгрузами z_k , пока не удовлетворится условие (8);

4. Перемещением кренгрузов по крестовине добиваются выполнения условия (9). При этом используется соотношение

$$y_G = (z_0 - z_G) \operatorname{tg} q \quad (12)$$

(обычно ограничиваются случаем $y_G = 0$).

5. Выполняется опыт по определению момента инерции модели относительно оси подвеса, для чего:

- модель отклоняется от положения равновесия на некоторый угол и приводится в колебательное движение.
- измеряется общее время некоторого числа (около ста) полных колебаний модели и вычисляется средний период колебаний t . Для измерения времени используют электронный или механический (желательно - двустрелочный) миллисекундомер.
- вычисляется момент инерции модели относительно оси подвеса по формуле

$$J_0 = g\Delta(z_0 - z_G) \left(\frac{t}{2\pi} \right)^2. \quad (13)$$

6. Вычисляется момент инерции относительно центральной продольной оси

$$J_{xG} = J_0 - \Delta(z_0 - z_G)^2. \quad (14)$$

Опыт повторяется при различных смещениях кренгрузов (одновременно - от стойки или - к стойке, на одинаковое расстояние), пока не будет выполнено условие (10).

С другими способами измерения момента инерции относительно оси подвеса (например способ "маятника сравнения") можно познакомиться в [7].

Момент инерции натурного судна может быть найден через его период качки, последний, как правило, определяется при креновании построенного судна. Кренование судна - это опытное определение аппликаты его центра тяжести после постройки. Оно требуется Правилами постройки и классификации судов. Для определения периода бортовой качки судно раскачивается, а затем производится регистрация его затухающих колебаний. Для судов длиной менее 70 м опытное определение периода колебаний требуется Кодексом ИМО [10].

Для оценки момента инерции судна по периоду бортовой качки необходимо располагать данными о присоединенном моменте инерции. Поскольку для обычных судов он в 4-5 раз меньше собственного, то ошибка в его оценке скажется на оценке момента инерции массы судна незначительно (например, при ошибке в присоединенном моменте инерции в 20 %, ошибка в моменте инерции массы не превысит 5 %).

Как известно, для обычных судов (с $B/d = 2...3,5$ и $|z_G - d/d| \approx 0...0,1$) влияние поперечно-горизонтальной качки на бортовую пренебрежимо мало.

Это позволяет описать бортовую качку т.н. "укороченным" уравнением:

$$(J_{xG} + I_{44})\ddot{q} + m_{44}\dot{q} + rg\nabla_0 h_0 = 0. \quad (15)$$

В соответствии с этим уравнением бортовая качка на тихой воде следует закону

$$q = \sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q t} \cos\left(w_q t - \arctg \frac{B}{A}\right), \quad (16)$$

где $n_q = \frac{m_{44}}{2(J_{XG} + I_{44})}$ - коэффициент затухания (демпфирования) колебаний;
 $w'_q = \sqrt{w_q^2 - n_q^2}$ - частота собственных затухающих колебаний, связанная с периодом колебаний формулой $t_q = \frac{2\pi}{w'_q}$. при $w_q = \sqrt{\frac{rg\nabla_0 h_0}{J_{XG} + I_{44}}}$, а A, B - определяются начальными условиями.

Отсюда следует

$$J_{XG} = \frac{g\Delta h_0}{1 + \left(\frac{n_q}{w'_q}\right)^2} \left(\frac{t}{2\pi}\right)^2 - I_{44}. \quad (15)$$

В последней формуле $\frac{n_q}{w'_q} \ll 1$, а присоединенный момент инерции I_{44} может быть с удовлетворительной точностью определен методами гидродинамической теории качки [11].

Обработку данных следует производить в форме приведенных ниже таблиц.

Результаты расчетов отклонений dz_G, dJ_{XG} в таблицах 1, 2 представляются графически как функции от z_k и $Q_L y_L^2 + Q_R y_R^2$ соответственно.

Приступим к практическому расчету.

Исходные данные (согласно индивидуальному заданию)

Судно

Тип и назначение _____

Водоизмещение, т $\Delta_M =$ _____

Момент инерции массы относительно центральной продольной оси, т·м² $J_{XG} =$ _____

Модель

Номер модели _____

Масштаб модели M _____

Расчетная аппликата центра тяжести модели, м $z_{G0} =$ _____

Расчетное водоизмещение модели, т $\Delta_{M0} =$ _____

Расчетный момент инерции массы модели относительно центральной продольной оси, т·м² $J_{XGM0} =$ _____

Взвешивание модели и подвеска на стенде

Водоизмещение модели, т $\Delta_M =$ _____

Масса кренгрузов, т левый борт $Q_L =$ _____

правый борт $Q_R =$ _____

Возвышение оси подвеса над основной плоскостью, м $z_0 =$ _____

Таблица 1 - Центровка модели

Элементы расчета	№ опытов								
	$z_k =$			$z_k =$			$z_k =$		
	1-2	1-3							
1. y_L''									
2. y_L'									
3. $dy_L = y_L'' - y_L'$									
4. y_R''									
5. y_R'									
6. $dy_R = y_R'' - y_R'$									
7. $Q_L dy_L + Q_R dy_R$									
8. q''									
9. q'									
10. tgq''									
11. tgq'									
12. $tgq'' - tgq'$									
13. $z_G = z_0 - \frac{(7)}{\Delta(12)}, \text{м}$									
14. $dz_G = z_G - z_{G0}, \text{м}$									

Таблица 2 - Момент инерции массы модели

$$g\Delta(z_0 - z_G) = \underline{\hspace{2cm}}$$

Элементы расчета	№ опытов								
	1								
1. y_L									
2. y_R									
7. $Q_L y_L^2 + Q_R y_R^2$									
3. № замеров	1								
4. Число колебаний N									
5. Общее время $\Sigma \tau$									
6. Средний период $\bar{t} = \frac{\Sigma t}{N}, \text{с}$									
7. Среднее средних $t = \frac{\Sigma \bar{t}}{3}, \text{с}$									
8. $J_0 = g\Delta(z_0 - z_G) \left(\frac{t}{2p} \right)^2$									
9. $J_{XGM} = J_0 - \Delta(z_0 - z_G)^2$									
10. $dJ_M = J_{XGM} - J_{XGM0}, \text{м}$									

Контрольные вопросы

1. Какие способы экспериментального определения момента инерции массы модели судна вы знаете? Опишите их суть.
2. Можно ли определить момент инерции массы натурного судна относительно центральной продольной оси по периоду его малых колебаний, и какую дополнительную информацию, в том числе, полученную методами гидродинамической теории качки, для этого нужно иметь?

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИСОЕДИНЕННОГО МОМЕНТА ИНЕРЦИИ И КОЭФФИЦИЕНТА ДЕМПФИРОВАНИЯ ПРИ БОРТОВОЙ КАЧКЕ КОРАБЛЯ

Цель работы: ознакомление с практическими способами экспериментального определения коэффициентов дифференциальных уравнений качки.

Содержание:

1. Определение присоединенного момента инерции и коэффициента демпфирования способом свободных затухающих колебаний модели судна.
2. Пересчет, с модели на натуру.

Приборы и оборудование:

1. Малый опытовый бассейн.
2. Модели судов с устройством для динамической тарировки.
3. Гирокренограф.
4. Компьютерный зал.

Программное обеспечение – MATHCAD.

Введение

Оценка гидродинамических коэффициентов дифференциальных уравнений качки является задачей параметрической идентификации математической модели качки. Применительно к поперечной качке традиционно используется упрощенный подход.

Упрощения математической модели поперечной качки основаны на результатах опытов и теоретических соображениях, которые позволяют утверждать, что для обычных судов влияние поперечно-горизонтальной качки на бортовую пренебрежимо мало. Бортовая качка совершается как бы независимо от поперечно-горизонтальной. Это позволяет описать бортовую качку одним уравнением, отделив его от системы уравнений поперечной качки.

Уравнение бортовой качки в линейном приближении в этом случае содержит четыре коэффициента гидродинамической природы - присоединенный момент инерции, коэффициент демпфирования и два коэффициента возмущающих сил. Современные методы гидродинамической теории качки основаны на концепции идеальной тяжелой жидкости, поэтому коэффициент возмущающих сил и присоединенный момент инерции, имеющие инерционно-волновую природу, удовлетворительно оцениваются теорией. Коэффициент демпфирования существенно определяется вязкостными эффектами и не поддается теоретической оценке, поэтому его приходится определять экспериментально.

Испытания способом свободных затухающих колебаний на тихой воде позволяют определить экспериментально не только коэффициент демпфирования, но также и присоединенный момент инерции.

Упрощенное (т. н. "укороченное") уравнение бортовой качки на тихой воде имеет вид

$$(J_{XG} + I_{44})\ddot{q} + m_{44}\dot{q} + rg\nabla_0 h_0 = 0. \quad (1)$$

Его общее решение может быть записано как

$$q = \sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q t} \cos\left(w_q' t - \arctg \frac{B}{A}\right), \quad (2)$$

где $n_q = \frac{m_{44}}{2(J_{XG} + I_{44})}$ - коэффициент затухания (демпфирования) колебаний;

$w_q' = \sqrt{w_q^2 - n_q^2}$ - частота собственных затухающих колебаний, связанная с периодом колебаний формулой $t_q = \frac{2\pi}{w_q'}$ при $w_q = \sqrt{\frac{rg\nabla_0 h_0}{J_{XG} + I_{44}}}$, а A, B - определяются начальными условиями.

Зависимость (2), в виде реализации закона затухающих колебаний

$$q = f(t), \quad (3)$$

является первичным документом опыта "свободные затухающие колебания".

Реализация $q = f(t)$ получается в опыте либо в графической, либо в электронной форме.

Далее задача сводится к тому, чтобы, используя (3), определить присоединенный момент инерции I_{44} и коэффициент демпфирования m_{44} . Поскольку I_{44} , m_{44} связаны с n_q, w_q' очевидными соотношениями

$$I_{44} = \frac{rg\nabla_0 h_0}{(w_q')^2 + n_q^2} - J_{XG}; \quad (4)$$

$$m_{44} = \frac{2n_q}{(w_q')^2 + n_q^2} rg\nabla_0 h_0, \quad (5)$$

то задачу удобно свести к оценке w_q', n_q по реализации (3).

Получение этой оценки есть задача параметрической идентификации. В простейшем случае она решается методом "точечного уравнивания". Применим этот метод.

Потребуем, чтобы кривая, описываемая выражением (2), и заданная реализация $q = f(t)$ имели общие точки экстремумов, по крайней мере, в каждой паре последовательных экстремумов i и $i+1$.

В каждой точке экстремума первая производная от q должна быть равна нулю, т.е., в точках экстремума должно быть

$$\begin{aligned} \dot{q} = & -n_q \sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q t} \cos\left(w_q' t - \arctg \frac{B}{A}\right) - \\ & - w_q' \sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q t} \sin\left(w_q' t - \arctg \frac{B}{A}\right) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Поскольку $\sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q t} \neq 0$, то, очевидно, должно выполняться условие

$$-n_q \cos\left(w_q' t - \arctg \frac{B}{A}\right) - w_q' \sin\left(w_q' t - \arctg \frac{B}{A}\right) = 0.$$

Обозначив аргумент тригонометрических функций j , будем иметь, в каждой точке экстремума

$$-n_q \cos j - w_q' \sin j = 0,$$

откуда

$$\operatorname{tg} j = -\frac{n_q}{w_q'} \neq f(i)$$

т.е., значение $\operatorname{tg} j$ не зависит от номера экстремума - $\operatorname{tg} j_{i+1} = \operatorname{tg} j_i$. Но тогда для последовательных экстремумов будет

$$j_{i+1} = j_i + p, \quad (7)$$

или

$$w_q' t_{i+1} - \operatorname{arctg} \frac{B}{A} = \left(w_q' t_i - \operatorname{arctg} \frac{B}{A} \right) + p$$

Отсюда имеем

$$w_q' = \frac{p}{t_{i+1} - t_i}. \quad (8)$$

Следовательно, одно из искоемых неизвестных - w_q' получается по (8), если измерить на $q = f(t)$ отрезок времени между моментами наступления двух последовательных экстремумов.

Остается найти второе неизвестное - коэффициент затухания n_q .

Экстремальные значения угла крена в последовательных экстремумах будут

$$\begin{aligned} q_i &= \sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q t_i} \cos j_i \\ q_{i+1} &= \sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q t_{i+1}} \cos(j_i + p) \end{aligned} \quad (9)$$

или, поскольку

$$\cos(j_i + p) = -\cos j_i,$$

то

$$q_{i+1} = -\sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q t_{i+1}} \cos j_i.$$

Выразив из (8) $t_{i+1} = \frac{p}{w_q'} + t_i$, получим,

$$q_{i+1} = -\sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q \left(t_i + \frac{p}{w_q'} \right)} \cos j_i. \quad (10)$$

Разделив (10) на (9), получим

$$\frac{q_{i+1}}{q_i} = -e^{-p \frac{n_q}{w_q'}},$$

откуда

$$\frac{n_q}{w_q'} = -\frac{1}{p} \ln \frac{-q_{i+1}}{q_i}.$$

Учитывая, что последовательные амплитуды имеют разные знаки, окончательно будем иметь

$$\frac{n_q}{w_q'} = -\frac{1}{p} \ln \left| \frac{q_{i+1}}{q_i} \right|. \quad (11)$$

Задача формально решена - теперь можно найти по (4), (5) l_{44} , m_{44} .

Практически определение n_q, w_q осложняется двумя обстоятельствами.

Первое заключается в том, что реализация затухающих колебаний всегда получается с некоторыми погрешностями, поэтому точная оценка моментов времени наступления экстремумов, вблизи которых функция изменяется слабо, практически невозможна. В меньшей степени это касается и значений самих амплитуд.

Второе обстоятельство связано с тем, что математическая модель бортовой качки не вполне адекватна реальному явлению, что проявляется в опыте в виде зависимости полученных значений l_{44}, m_{44} от амплитуды (и, следовательно, номера i в последовательности экстремумов).

Первое обстоятельство можно обойти, введя в рассмотрение, кроме экстремумов, еще и нули реализации затухающих колебаний. Моменты наступления нулей фиксируются на реализации значительно точнее моментов наступления экстремумов.

Рассмотрим последовательные нули реализации затухающих колебаний $k, k+1$ и т.д. Тогда из (2) получаем

$$\begin{aligned} 0 &= \sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q t_k} \cos\left(w_q t_k - \arctg \frac{B}{A}\right); \\ 0 &= \sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q t_{k+1}} \cos\left(w_q t_{k+1} - \arctg \frac{B}{A}\right). \end{aligned}$$

Снова, поскольку, $\sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q t} \neq 0$, в точках нулей, по любому k должно выполняться условие

$$\cos\left(w_q t_k - \arctg \frac{B}{A}\right) = 0.$$

Но последовательные углы, косинус которых равен нулю, отличаются на π . Таким образом,

$$w_q t_{k+1} - \arctg \frac{B}{A} = \left(w_q t_k - \arctg \frac{B}{A}\right) + \pi,$$

откуда получаем

$$w_q = \frac{\pi}{t_{k+1} - t_k}. \quad (12)$$

Следовательно, измеряя отрезки времени между последовательными нулями реализации затухающих колебаний, можно достаточно точно определить w_q .

Уменьшения влияния случайных ошибок в оценке амплитуд можно добиться, введя в рассмотрение всю последовательность амплитуд и аппроксимировав её некоторой простой функцией.

Имеем, в последовательных точках экстремумов

$$\begin{aligned} q_i &= \sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q t_i} \cos j_i; \\ q_{i+1} &= -\sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q \left(t_i + \frac{\pi}{w_q}\right)} \cos j_i = -q_i e^{-\pi \frac{n_q}{w_q}}; \\ q_{i+2} &= \sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q \left(t_i + 2 \frac{\pi}{w_q}\right)} \cos j_i = q_i e^{-2\pi \frac{n_q}{w_q}}; \end{aligned}$$

$$q_{i+3} = -\sqrt{A^2 + B^2} e^{-n_q \left(t_i + 3 \frac{p}{w_q} \right)} \cos j_i = -q_i e^{-3p \frac{n_q}{w_q}} ;$$

$$q_{i+j} = (-1)^j q_i e^{-jp \frac{n_q}{w_q}} \Rightarrow |q_{i+j}| = |q_i| e^{-jp \frac{n_q}{w_q}} .$$

Откуда, очевидно

$$\lg |q_{i+j}| = \lg |q_i| - p \frac{n_q}{w_q} \lg e \cdot j = a - b \cdot j . \quad (13)$$

Это - уравнение прямой линии $\lg |q_{i+j}|$ как функции j .

Аппроксимируем точки экспериментальной зависимости $\lg |q_{i+j}| = f(j)$ линией (прямой или близкой к ней). Тогда

$$\frac{d|q_{i+j}|}{dj} = -p \frac{n_q}{w_q} |q_{i+j}| ,$$

так что для каждого j можно найти

$$\frac{n_q}{w_q} = -\frac{1}{p} \frac{d|q_{i+j}|/dj}{|q_{i+j}|} . \quad (14)$$

Задача решена. Рассмотренный прием позволяет просто исключить случайные ошибки в оценках $\frac{n_q}{w_q}$ и выделить (если она есть) нелинейность демпфирования качки.

Способ свободных затухающих колебаний при исследовании параметров бортовой качки уникален в том отношении, что он может выполняться (и выполняется!) не только на моделях, но и на натурных судах. Более того, для судов длиной до 70 м Кодексом ИМО [10] требуется обязательное определение периода собственных колебаний опытным путем. Выполнив требуемые испытания с регистрацией углов крена во времени, можно получить необходимую для расчета I_{44} , m_{44} натурального судна.

Получив значения I_{44} , m_{44} для модели, следует, используя положения теории моделирования, пересчитать результаты на натуру.

При достаточно больших значениях критерия $\frac{\sqrt{gB^3}}{n}$, а именно, при $\frac{\sqrt{gB^3}}{n} > 5,2 \cdot 10^5$, безразмерные присоединенные моменты инерции и коэффициенты демпфирования будут равны для модели и натурального судна, если при испытаниях модели были выполнены условия подобия, т.е., если модель была сделана геометрически подобной натуре, и были сделаны попарно равными для модели и для природы значения определяющих критериев:

$$\frac{\Delta}{rB^3}, \frac{J_{xG}}{rB^5}, \frac{z_G}{B} \cdot \frac{y_G}{B}, q(0), \dot{q}(0).$$

В обоих случаях обработку данных следует производить в форме приведенной ниже таблицы.

Таблица 1 - Коэффициенты затухания и частота собственных затухающих колебаний бортовой качки модели (окончание)

i	k	$q_0 = \frac{ q_{i+1} + q_i }{2}$	$t_{k+1} - t_k$	$w_q = \frac{p}{t_{k+1} - t_k}$

По результатам расчетов в таблице 1 строятся графики $\frac{n_q}{w_q}, w_q = f(q_0)$.

Графики сглаживаются.

Приводится анализ графиков, по результатам которого следует отметить:

- наличие или отсутствие нелинейности по демпфированию для данного судна

- возможность описания качки данного судна принятым "укороченным" уравнением;

- указать численные значения $\frac{n_q}{w_q}$ при малых амплитудах качки и определить по ним значения l_{44} , m_{44} , а также период качки натурального судна.

Контрольные вопросы

1. Как определить значения $\frac{n_q}{w_q}$ по графику затухающих колебаний с помощью графических построений?

2. Как можно вынести суждение об адекватности используемой при обработке затухающих колебаний математической модели качки по полученным в опыте зависимостям $\frac{n_q}{w_q}, w_q = f(q_0)$?

3. Как изменяются качественно зависимости $\frac{n_q}{w_q}, w_q = f(q_0)$ при установке на модели скуловых килей? Можно ли рекомендовать их установку в целях умерения качки?

4. Какие практические ограничения на размеры скуловых килей приходится учитывать при их проектировании, и чем эти ограничения вызваны?

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДУКЦИОННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ К ГЛАВНОЙ ЧАСТИ ВОЗМУЩАЮЩИХ СИЛ ПРИ БОРТОВОЙ КАЧКЕ СУДОВ

Цель работы: освоение практических способов определения редуционных коэффициентов к главной части возмущающих сил при бортовой качке судов.

Содержание:

1. Ознакомление с основными способами расчетного определения редуционных коэффициентов к главной части возмущающих сил при бортовой качке судов

2. Освоение программы KARPA_1.

3. Практический расчет редуционных коэффициентов к главной части возмущающих сил при бортовой качке судна (согласно индивидуальному заданию).

Приборы и оборудование:

1. Компьютерный зал

Программное обеспечение - MATHCAD, KARPA_1.

Введение

Силы, действующие на судно со стороны воды при качке на регулярном волнении, сложным образом зависят от характеристик самого судна, собственного движения судна, характеристик набегающих волн и ориентировки судна относительно направления бега волн. В линейном приближении эти силы разделяются на силы гидростатической природы и силы гидродинамической природы, первые именуются "восстанавливающими" и зависят только от мгновенных значений координат, описывающих положение корабля относительно невозмущенной поверхности воды, а вторые, в которых принято выделять т.н. "главную часть возмущающих сил" и "силы инерционно-демпфирующие" зависят от характеристик волнения. Главная часть возмущающих сил, иначе именуемая "силами Фруда - Крылова", определяется гипотезой Фруда - Крылова (гипотезой "проницаемости"), согласно которой на каждый элемент поверхности погруженной в воду части судна на волнении действует то же давление, которое действовало бы в той же точке пространства в отсутствие судна. Само судно считается неподвижным.

Подобное подразделение используется по той причине, что экспериментальное определение возмущающих сил до настоящего времени затруднено препятствиями технического порядка и осуществлено только для малого числа моделей; результаты этих экспериментов не отличаются высокой точностью.

Гипотеза Фруда - Крылова дает возможность расчетом определить основную часть сил, вызывающих качку судна. Однако расчет сводится к вычислению интегралов с осциллирующими подынтегральными функциями, притом - по мгновенной смоченной поверхности корпуса судна и мгновенной поверхности действующей ватерлинии. Вычисление таких интегралов, даже при современном уровне вычислительной техники, настолько сложно, что не используется в практических расчетах для конкретного, заданного теоретическим чертежом, корпуса судна.

Взамен принято:

- вводить в рассмотрение некоторую математическую модель корпуса судна, однозначно определяемую ограниченным числом параметров формы и позволяющую получить аналитическое представление коэффициентов главной части возмущающих сил;

- выполнять расчеты сил Фруда - Крылова для широкого диапазона изменения параметров математической модели корпуса и параметров набегающего волнения и представлять их в графической форме;

- использовать в практических расчетах качки представленные в аналитической или графической форме зависимости для коэффициентов главной части возмущающих сил.

Известно, что силы Фруда - Крылова могут быть представлены в следующем виде:

- при вертикальной качке;
- при поперечно-горизонтальной;
- при боковой;
- при рыскании.

В этих формулах:

- плотность забортной воды, $\text{т}\cdot\text{м}^{-3}$;
- погруженный объем судна по исходную ватерлинию, м^3 ; начальная метацентрическая высота, м ;
- момент инерции погруженного объема относительно плоскости ;
- амплитуда волны, м ; амплитуда её угла волнового склона и циклическая частота волны, с^{-1} .
- редуccionные коэффициенты.
- частота встречи с волной (здесь - скорость хода судна, - курсовой угол набегающих волн).

Как видно, расчет соответствующих сил сводится к расчету редуccionных коэффициентов.

Из многих, предложенных к настоящему времени, способов расчета редуccionных коэффициентов к главной части возмущающих сил [5,16,11,17,12] на практике обычно используется канонизированный [18] способ С.Н. Благовещенского [16], дополненный В. А. Мореншильдт.

С. Н. Благовещенским в качестве математической модели корпуса принята модель, имеющая ту же длину, ширину и осадку, а также коэффициенты полноты мидель-шпангоута и вертикальной полноты, что и действительное судно.

Диаметраль этой модели имеет вид прямоугольника, а ватерлинии - параболы. Ширина по ватерлинии, соответствующей осадке, изменяется с изменением осадки по параболе, степень которой определяется коэффициентом полноты мидель-шпангоута судна, а площадь соответствующей ватерлинии и её момент инерции относительно продольной оси изменяется по параболом, степень которых зависит от коэффициента вертикальной полноты.

Редукционные коэффициенты по С. Н. Благовещенскому – В.А. Мореншильдт определяются следующими формулами:

$$k_q = \frac{k_b'' k_r r_0 - k_b' (k_{zw} z_w - k_{zp} z_p)}{h_0} |\sin c_w|;$$

$$k_h = \left[k_b' f_1 - k_b'' \frac{C_W^2}{11,4 C_B} \left(\frac{B}{d} \right)^2 f_2 \sin^2 c_w \right] |\sin c_w|;$$

$$k_z = k_b' (1 - kd C_{PV} f_1) - k_b'' \frac{C_W}{11,4} kd \left(\frac{B}{d} \right)^2 \left[\frac{kd}{2} - f_2 \right] \sin^2 c_w;$$

$$k_c = \left[k_b' f_1 - k_b'' \left(\frac{B}{d} \right)^2 \frac{C_W^2}{6 C_{PV} (3 - C_W)} f_2 \sin^2 c_w \right] |\sin c_w \cos c_w|$$

В этих формулах

$$z_w = d - z_{C0};$$

$$z_p = d - z_G;$$

$$k = \frac{w^2}{g} - \text{частота формы волны (волновое число), м}^{-1};$$

$$k_r = k_B k_d,$$

где $k_B = 1 - \left(\frac{B w^2}{2 p g} \right)^2 \sqrt{C_W};$

$$k_d = 1 - y \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i \frac{p^i}{i!} \frac{1}{y + i(1-y)},$$

при $y = C_{PV} - 0,4(1 - C_{PV});$

$$k_{zp} = f_1 - \frac{r_0}{d} f_2,$$

где $f_1 = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i \frac{p^i}{i!} \frac{1}{(i+1)(i+1-iC_{PV})};$

$$f_2 = \frac{(kd)^2}{2} y f_1$$

$$k_{zw} = f_3 - \frac{r_0}{d} f_4, \text{ где}$$

$$f_3 = 1 + 2(2 - C_{PV}) \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i \frac{p^i}{i!} \frac{1}{(i+2)[1 + (i+1)(1 - C_{PV})]},$$

$$f_4 = \frac{(kd)^2}{2} y \frac{2 - C_{PV}}{2 - y} f_3;$$

$$k_b' = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i \frac{u^{2i}}{(2i+1)!} \cdot \frac{1}{C_W + (2i+1)(1 - C_W)};$$

$$k_B = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i \frac{u^{2i}}{(2i+1)! [C_W + (2i+1)(1-C_W)] [2C_W + (2i+1)(1-C_W)] [3C_W + (2i+1)(1-C_W)]}$$

где $u = \frac{LW^2}{2g} |\cos c_w|$.

Приведенные выше формулы реализованы программно в КАРРА_01, которой и необходимо воспользоваться.

Далее, в соответствии с индивидуальным заданием следует выполнить расчет редуционных коэффициентов к главной части возмущающих сил.

Предварительно следует установить диапазон частот набегающих волн, в котором необходимо определить редуционные коэффициенты, указать курсовые углы волнения и скорость хода судна.

При этом следует иметь в виду, что значения редуционных коэффициентов желательно знать в интервале частот $0 - 3\omega_q$, т.е. до утроенной частоты собственных колебаний при бортовой качке. Последняя приближенно может быть определена как $\omega_q = \frac{2\pi}{t_q}$, где период бортовой качки $t_q \approx \frac{k_I B}{\sqrt{h_0}}$. Значение инерционного коэффициента k_I можно определить по статистическим данным [5, с. 239].

Исходные данные для расчета

Длина судна по ватерлинии, м	$L =$ _____
Ширина судна по ватерлинии, м	$B =$ _____
Осадка судна по ватерлинию, м	$d =$ _____
Коэффициент полноты водоизмещения	$C_B =$ _____
Коэффициент полноты ватерлинии	$C_W =$ _____
Начальный метацентрический радиус, м	$r_0 =$ _____
Аппликата центра величины, м	$z_{C0} =$ _____
Аппликата центра тяжести, м	$z_G =$ _____
Курсовой угол, градусы	$\chi =$ _____
Диапазон частот набегающих волн, c^{-1}	$0 - \omega_{\max} =$ _____
Шаг по частоте (для табличного вывода), c^{-1}	$\delta\omega =$ _____

Результаты расчета, в текстовом и графическом виде прилагаются к отчету.

Контрольные вопросы

1. Как выполняются испытания модели в целях экспериментального определения коэффициентов возмущающих сил, и какие технические сложности возникают при этом?
2. Какие компоненты возмущающих гидродинамических сил не учитываются гипотезой Фруда - Крылова?
3. Опишите основные особенности математической модели корпуса судна, введенной С.Н. Благовещенским при разработке способа оценки редукционных коэффициентов?

5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕШЕНИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ КАЧКИ В РАСЧЕТАХ БОРТОВОЙ КАЧКИ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

Цель работы:

1. Практическое ознакомление с расчетами бортовой качки с использованием результатов гидродинамической теории (А. З. Салькаев и др.) совместно с результатами физического моделирования.
2. Освоение приемов работы с программой ROLLING.

Содержание:

1. Расчет бортовой качки судна на заданном нерегулярном волнении с использованием результатов гидродинамической теории качки и поправок на влияние вязкости жидкости и трехмерности обтекания по данным испытаний моделей (В.А. Мореншильдт - А.И. Шмуруна и др.).

Приборы и оборудование:

1. Компьютерный зал.

Программное обеспечение – ROLLING.

ВВЕДЕНИЕ

Суда и плавучие сооружения должны проектироваться так, чтобы в условиях часто встречающегося волнения амплитуды различных видов качки не превышали допустимых значений. Поэтому при практических расчетах качки ограничиваются рассмотрением случаев качки с умеренными амплитудами. В этом случае в расчетах качки допустимо применение линеаризированных дифференциальных уравнений качки. В линейной постановке задачи при расчете качки на нерегулярном морском волнении становятся применимыми хорошо разработанные методы спектральной теории случайных процессов.

Точность результатов расчета качки зависит от полноты математической модели и применяемого метода линеаризации [1]. Весьма существенно результаты расчета зависят от точности оценки коэффициентов гидродинамических сил, входящих в уравнения качки. Поскольку ни теория, в её современном виде, ни эксперимент, при имеющихся технических возможностях, не позволяют порознь определить все коэффициенты гидродинамических сил с достаточной точностью, приходится использовать смешанный способ - коэффициенты возмущающих и восстанавливающих сил вычислять теоретическим путем, а остальные коэффициенты определять с использованием результатов экспериментов. В первую очередь это относится к коэффициентам демпфирующих сил и, отчасти, сил инерционных. Точность результатов при этом существенно зависит от точности используемых решений гидродинамической теории качки и достоверности результатов экспериментов (масштаба физических

моделей, способа обработки результатов, математической модели, принятой при обработке данных эксперимента).

Общая схема расчета бортовой качки на нерегулярном морском волнении состоит в следующем.

Амплитуды качки $q_{0q\%}$ заданной $q\%$ обеспеченности и средний период крупных колебаний $\bar{t}_q$ на нерегулярном волнении, вычисляются как

$$q_{0q\%} = K_q D_q^{1/2} ; \quad (1)$$

$$\bar{t}_q = 2\pi \sqrt{\frac{D_q}{D_{\dot{q}}}} , \quad (2)$$

где дисперсии углов и угловых скоростей качки $D_q, D_{\dot{q}}$ вычисляются по формулам

$$D_q = \int_0^\infty [\Phi_{rq}(w)]^2 S_r(w) dw ; D_{\dot{q}} = \int_0^\infty [\Phi_{rq}(w)]^2 w^2 S_r(w) dw, \quad (3)$$

Спектральная плотность ординат двумерного нерегулярного волнения $S_r(\omega)$ задается двумя параметрами - высотой волн 3%-й обеспеченности $h_{3\%}$ и частотой максимума спектра волновых ординат ω_m .

Функция $\Phi_{rq}(w)$ - амплитудно-частотная характеристика системы уравнений бортовой качки [19,20,21,6] (4)

$$\begin{aligned} (\Delta + I_{22})\ddot{h}_G + m_{22}\dot{h}_G - m_{42}\dot{q} - I_{42}\ddot{q} &= r_0 F_C \cos wt + r_0 F_C \sin wt; \\ (J_{xi} + I_{44})\ddot{q} + I_{44}\dot{q} + r g \nabla_0 h_0 q - m_{24}\dot{h}_G - I_{24}\ddot{h}_G &= \\ &= r_0 M_C \cos wt + r_0 M_S \sin wt \end{aligned} \quad (4)$$

при качке судна на регулярной волне с

$$z_r = r_0 \cos wt . \quad (5)$$

Общее решение системы, при больших временах от начала движения, имеет вид

$$q = r_0 \Phi_{rq}(w) \cos(wt - e_{rq}) \quad (6)$$

Амплитудно-частотная характеристика $\Phi_{rq}(w)$ системы уравнений качки, таким образом, является функцией многих параметров

$$\Phi_{rq} = f(r g \nabla_0, J_{XG}, h_0, m_{ij}, I_{ij}, F_{c,s}, M_{c,s}, w)$$

Водоизмещение, момент инерции массы судна и его начальная метацентрическая высота ∇_0, J_{XG}, h_0 в расчете считаются известными, а остальные коэффициенты уравнений подлежат оценке.

В программе ROLLING значения $m_{ij}, \dots$ определяются следующими параметрами

$$\begin{matrix} m_{ij} \\ I_{ij} \\ F_{c,s} \\ M_{c,s} \end{matrix} f \left(r, n, g, \left(\frac{\nabla_0}{L} \right)^{1/2}, L, B, d, z_G - d, \dots, w \right)$$

где $\sqrt{\frac{\nabla_0}{L}}$ - характерный поперечный размер судна.

В линейном приближении $m_{ij}...$, формально считаются независимыми от амплитуд колебаний по q, h_q .

Значения $m_{ij}...$, должны определяться с использованием результатов гидродинамической теории качки и данных испытаний физических моделей.

Компоненты гидродинамических сил, определяемые гидродинамической теорией качки

Методы гидродинамической теории качки [5, 19, 20, 21] позволяют получить оценки всех коэффициентов уравнений, однако без учета влияния вязкости и, в инженерных приложениях, только для двухмерных объектов, т.е. в рамках т.н. "гипотезы плоских сечений" [20, 21].

Учет влияния вязкости воды (и трехмерности обтекания корпуса) на коэффициенты гидродинамических сил выполняется с использованием экспериментальных данных.

В предлагаемой версии программы для определения коэффициентов гидродинамических сил без учёта влияния вязкости используются данные, полученные А.З. Салькаевым [19, 20, 21] методом М.Д. Хаскинда.

Сравнительные расчеты показали, что возможные неточности результатов А.З. Салькаева и значительная протяженность цилиндрической вставки на современных судах делают нецелесообразным расчет гидродинамических сил с использованием гипотезы плоских сечений и позволяет перейти к их оценке для математической модели всего корпуса судна. В качестве математической модели может быть принят понтон с теми же ∇_0 , J_{xG} и L , что и реальное судно и эквивалентный ему по начальной устойчивости, т.е. имеющий попарно одинаковые с реальным судном значения $z_m - d$, $z_G - d$.

Вязкостные компоненты гидродинамических сил

Учет влияния вязкости выполняется с использованием эксперимента. В настоящее время это возможно практически только применительно к коэффициенту демпфирования бортовой качки и присоединенному моменту инерции.

Для определения вязкостных компонент m_{ij}, l_{ij} желательно использовать результаты испытаний модели конкретного судна. При их отсутствии приходится использовать известные результаты различных испытаний судов или понтонов (В.А. Мореншильдт [18], Vugts и др.).

подавляющее большинство опытов по экспериментальному определению гидродинамических коэффициентов выполнялось на моделях способом свободных затухающих колебаний; непосредственными результатами

опытов были значения коэффициента затухания n_q и частоты собственных затухающих колебаний w_q .

Анализ результатов испытаний крупных моделей показал, что:

1) У судов без скуловых килей коэффициенты затухания (безразмерные) $m_q = \frac{n_q}{w'_q}$ слабо возрастают с ростом амплитуды колебаний и сильно возрастают с ростом собственной частоты колебаний.

Частота собственных колебаний практически не зависит от амплитуды.

2) У судов со скуловыми килями коэффициенты затухания при очень малых амплитудах практически совпадают с коэффициентами затухания тех же моделей без скуловых килей, а с ростом амплитуды колебаний быстро возрастают; темп возрастания $m_q = f(q_0)$ при значительных амплитудах q_0 падает. С ростом частоты собственных колебаний коэффициент затухания возрастает, темп возрастания постепенно падает.

Частота собственных колебаний слабо падает с ростом амплитуд.

3) Результаты различных экспериментов плохо согласуются друг с другом.

В настоящей работе, при отсутствии данных испытаний модели конкретного судна, для оценки коэффициентов демпфирования удобно использовать результаты испытаний моделей судов, выполненных В.А. Мореншильдт. Эти результаты, в переработке А. И. Шмуруна, включены в РД 5. 1003-80 [18]

Результаты В. А. Мореншильдт относятся к судам, имеющим

$$\frac{L}{B} = 7,5 \dots 11,5; \quad \frac{B}{d} = 2 \dots 5; \quad C_W = 0,7 \dots 0,8; \quad C_B = 0,45 \dots 0,55, .$$

$$\frac{h_0}{B} = 0,02 \dots 0,15, \quad \frac{S_{BK}}{LBC_W} = 0 \dots 0,06$$

при относительном периоде качки

$$t_q \sqrt{\frac{g}{B}} = 8 \dots 14$$

и амплитудах качки

$$q_0 = 5^\circ \dots 15^\circ .$$

Процедура введения поправок на вязкость к коэффициенту демпфирования в ROLLING основана на результатах анализа экспериментальных данных, и состоит в следующем.

Во-первых, коэффициент демпфирования бортовой качки m_{44} представляется в виде

$$m_{44} = m_{44W} + m_{44V} , \quad (7)$$

т. е. в виде суммы коэффициентов волновой и вязкостной природы.

По данным испытаний модели способом свободных затухающих колебаний оцениваются значения частоты затухающих колебаний w'_q и безразмерного коэффициента затухания $m_q = \frac{n_q}{w'_q}$ в зависимости от амплитуды качки.

Затем, определив по результатам гидродинамической теории коэффициент волнового демпфирования m_{44W} , можно вычислить такое значение m_{44V} , при котором будет иметь место найденное из опыта значение коэффициента затухания μ_0 .

При использовании данных, полученных способом свободных затухающих колебаний, полученное значение m_{44V} относится только к частоте колебаний, совпадающей с собственной частотой w_q . Однако анализ известных результатов испытаний показывает, что в безразмерной форме, принятой в программе ROLLING, где

$$m_{44}^* = \frac{m_{44}L}{r \nabla_0^2 w}$$

имеет место практическая независимость m_{44V}^* от безразмерной частоты колебаний, так что

$$m_{44V}^* \neq f(\tilde{w}). \quad (9)$$

Поэтому m_{44V}^* может быть экстраполировано на другие частоты без изменения численного значения.

Основную проблему при использовании линейной математической модели качки представляет учет нелинейности m_{44V}^* по амплитуде качки q_0 . Соответствующая процедура статистической линеаризации рассматривается далее.

При отсутствии данных испытаний конкретного судна для определения коэффициента m_q в настоящей работе используется формула из РД 5.1003-80 [18]:

$$m_q = \left(1,78 - 0,078 t_q \sqrt{\frac{B}{g}} \right) \times \\ \times \left[0,044 + 0,00125 \left(\frac{B}{d} \right)^4 + \left(0,262 - 0,484 \frac{d}{B} \right) \frac{100 S_{BK}}{L B C_W} \right] \frac{B}{100 h_0} (0,5 + 0,05 q_0^\circ) \quad (10)$$

(где $t_q = \frac{2\rho}{w_q}$).

Далее процедура расчета состоит в следующем.

Зная m_q , вычисляем по (7) соответствующие значения коэффициента демпфирования m_{44} , и переходим к безразмерной форме по формуле

$$m_{44}^* = \frac{m_{44}L}{r \nabla_0^2 w}. \quad (11)$$

Теперь коэффициент вязкостного демпфирования m_{44V}^* определяется как разность коэффициента демпфирования m_{44}^* и его волновой части m_{44W}^* - коэффициента волнового демпфирования.

Коэффициент m_{44W}^* находится без проблем предварительным прогоном программы ROLLING, которая, при $m_{44V}^* = 0$, выводит все вычис-

ленные ею на частоте свободных колебаний гидродинамические коэффициенты без учета вязкости. Очевидно

$$m_{44W}^* = m_{44|m_{44V}=0}^* .$$

Коэффициент волнового демпфирования в линейном приближении не зависит от амплитуды качки.

Коэффициент вязкостного демпфирования теперь вычисляется как

$$m_{44V}^* = m_{44}^* - m_{44W}^* . \quad (12)$$

Введя в программу ROLLING поправку m_{44V}^* , выполним расчет качки уже с учетом вязкостного демпфирования.

Поскольку m_{44V}^* зависит от неизвестной амплитуды качки q_0 , для получения решения в замкнутом виде необходимо использовать некоторую процедуру линеаризации исходной системы дифференциальных уравнений качки.

Каждому значению q_0 соответствуют некоторая амплитуда качки принятой обеспеченности

$$q_{0q\%}$$

и безразмерный средний период бортовой качки

$$\bar{t}_q = \bar{t}_q g^{1/2} \left(\frac{L}{\nabla_0} \right)^{1/4} ,$$

так что

$$\left. \begin{array}{l} q_{0q\%} \\ \bar{t}_q \end{array} \right\} = f(q_0) . \quad (13)$$

В данной работе неоднозначность решения исключается условием энергостатистической эквивалентности линейной и нелинейной математической модели качки. По А.В. Герасимову (см. также РД 5.1003-80 [18]) при нелинейном демпфировании статистически эквивалентными линейная и нелинейная системы становятся, если при некотором значении $\mu_{44V}^*(\theta_0)$ выполняется условие

$$\dot{q}_0(q_0) = 1,9 \sqrt{D_q(q_0)} . \quad (14)$$

В результате определяется искомая амплитуда качки заданной обеспеченности $q_{01,1\%}^\circ$ в градусах и безразмерный средний период крупных колебаний $\bar{t}_q$, затем вычисляется и размерный средний период

$$\bar{t}_q = \bar{t}_q \sqrt{\frac{1}{g} \cdot \left(\frac{\nabla_0}{L} \right)^{1/2}} , \text{ с.} \quad (15)$$

Результаты расчета зависят от вида принятого спектра волнения, который следует выбрать, исходя из дополнительных соображений.

Порядок расчета по ROLLING излагается в Приложении Б.

Для выполнения расчета необходимо подготовить данные, перечисленные ниже.

1. Исходные данные

1.1 По волнению

Вид спектра волновых ординат.

Программа предлагает на выбор четыре вида спектра ветрового волнения:

- а) Вознесенского А.И. - Нецветаева Ю.А.;
- б) Давидана И.Н.;
- в) 2 ISSC (модифицированный спектр Московица - Пирсона);
- г) 12 ITTC;

а также спектр зыби по Давидану И.Н.

Высота волн трехпроцентной обеспеченности $h_{3\%}$;

Частота максимума спектра волновых ординат w_M .

1.2 По судну

1.2.1. Вариант расчета;

1.2.2. Вариант загрузки судна;

1.2.3. Водоизмещение Δ , т;

1.2.4. Координаты центра тяжести: x_G, y_G, z_G , м;

1.2.5. Момент инерции массы судна относительно продольной центральной оси J_{xG} , т·м²;

1.2.6. Длина судна L_P , м;

1.2.7. Ширина судна по ватерлинии B , м;

1.2.8. Высота борта D , м;

1.2.9. Плотность забортной воды, ρ , т·м⁻³;

1.2.10. Осадка d , м;

1.2.11. Угол дифферента γ , градусы;

1.2.12. Угол крена φ , градусы;

1.2.13. Начальная метацентрическая высота h_0 , м;

1.2.14. Угол максимума диаграммы остойчивости θ_m , град;

1.2.15. Площадь ватерлинии s_0 , м²;

1.2.16. Длина скулового киля l_{BK} , м;

1.2.17. Ширина скулового киля b_{BK} , м;

1.2.18. Скорость хода V , уз.

После подготовки данных (следует использовать информацию из Практических работ 5 и 6) можно приступить к расчету качки по программе ROLLING.

Программа ROLLING создана в среде MSDOS, графические средства которой конфликтуют с средствами WINDOWS, поэтому для принудительной русификации графики перед запуском программы ROLLING следует загрузить русификатор RKSD.

Содержание отчета

1. Краткое изложение постановки задачи и метода её решения.
2. Подготовка исходных данных по судну.
3. Поиск и подготовка данных по экспериментальной оценке коэффициента демпфирования бортовой качки.
4. Обоснование выбора вида спектра волнения.
5. Выбор значений расчетных параметров волнения.
6. Обоснование выбора расчетной обеспеченности амплитуд качки.
7. Документ работы программы ROLLING.
8. Анализ результатов расчета.
9. Вывод о степени мореходности рассматриваемого судна.

Контрольные вопросы

1. Укажите основные отличия математической модели бортовой качки, принятой в гидродинамической теории, от модели, принятой в РД 5.1003-80.
2. Перечислите коэффициенты уравнений качки в порядке убывания их зависимости от эффектов, обусловленных вязкостью воды.
3. Как оценить значение момента инерции массы судна относительно центральной продольной оси, используя результаты опытного определения периода малых собственных колебаний судна и данные о присоединенном моменте инерции по гидродинамической теории?
4. Сравните результаты расчета качки данного судна по программе и по методике, принятой в Практических работах 5 и 6. Чем можно объяснить расхождение в оценках качки? Допустимы ли, по Вашему мнению, такие расхождения?

6. РАСЧЕТ ПРОДОЛЬНОЙ КАЧКИ СУДОВ НА НЕРЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

Предисловие

Работа содержит расчет амплитудно-частотных характеристик продольной качки и расчет вероятностных характеристик продольной качки кораблей и других однокорпусных плавучих сооружений, а также их модулей на морском ветровом волнении.

Расчет выполняется на основании Задания, выданного кафедрой ОК. Основные элементы и главные размерения корабля принимаются по данным КП по статике корабля.

Методика расчета основана на РД 5.1003-80 "Методика расчета качки водоизмещающих кораблей и судов" [18] (в сокращенном объеме).

По результатам расчета делается Заключение о мореходности корабля в отношении продольной качки и, при необходимости, даются рекомендации по повышению его мореходности.

Указания основаны на последних работах отечественных и зарубежных специалистов и могут служить руководством при выполнении курсовых, выпускных и дипломных работ.

Указания являются введением к программному обеспечению расчета продольной качки судов и судоподобных однокорпусных сооружений.

1 Введение. Постановка задачи

В качестве меры вертикальной $z_G(t)$ и килевой качки $y(t)$ на морском ветровом волнении рассматриваются вероятностные характеристики качки - $\bar{z}_0, \bar{y}_0$ - средние амплитуды и $z_{03\%}, y_{03\%}$ - амплитуды трехпроцентной обеспеченности, которые определяются в предположении, что эти амплитуды качки распределены по закону Релея; в этом случае амплитуды определяются соответствующими дисперсиями D_z, D_y , так что:

$$\begin{aligned}\bar{z}_0 &= 1,25\sqrt{D_z}, & z_{03\%} &= 2,64\sqrt{D_z}, \\ \bar{y}_0 &= 1,25\sqrt{D_y}, & y_{03\%} &= 2,64\sqrt{D_y}.\end{aligned}\tag{1}$$

Средние периоды крупных колебаний $\bar{t}_z, \bar{t}_y$, находятся через дисперсии перемещений D_z, D_y и скоростей $D_{\dot{z}}, D_{\dot{y}}$ качки как

$$\bar{t}_z = 2\pi \sqrt{\frac{D_z}{D_{\dot{z}}}}, \quad \bar{t}_y = 2\pi \sqrt{\frac{D_y}{D_{\dot{y}}}}.\tag{2}$$

Таким образом, вероятностные характеристики качки можно получить, если определены дисперсии перемещений и скоростей.

Для судна на ходу на двумерном ветровом волнении дисперсии перемещений и скоростей находятся интегрированием по частоте псевдоспектров соответствующих перемещений и скоростей.

Предполагается, что движение судна описывается системой линейных дифференциальных уравнений, и амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики Φ_{rz}, Φ_{ry} (или соответствующие передаточные функции) предварительно определены.

Волнение задается спектральной плотностью его ординат $S_r(w)$, соответствующей расчетной силе волнения (и высоте волн 3%-ой обеспеченности $h_{3\%}$).

Дисперсии перемещений и скоростей определяются интегралами

$$D_z = \int_0^\infty \Phi_{rz}^2(w_k) S_r(w) dw, \quad D_{\dot{z}} = \int_0^\infty \Phi_{rz}^2(w_k) w_k^2 S_r(w) dw; \quad (3)$$

$$D_y = \int_0^\infty \Phi_{ry}^2(w_k) S_r(w) dw, \quad D_{\dot{y}} = \int_0^\infty \Phi_{ry}^2(w_k) w_k^2 S_r(w) dw. \quad (4)$$

Теперь достаточно оговорить курсовой угол волнения σ , и задача расчета продольной качки судна может быть решена до конца.

Процедура расчета сводится к последовательному выполнению следующих операций:

- выбору расчетного режима (скорость, курс), расчетной силы волнения и его спектральной плотности;
- составлению системы дифференциальных уравнений движения корабля при продольной качке и определению численных значений параметров уравнений;
- расчету амплитудно- и фазово-частотных характеристик качки;
- определению дисперсий перемещений и скоростей и, наконец,
- оценке вероятностных характеристик качки.

Рассмотрим подробно каждую из этих операций.

2 Исходные данные

2.1 Тип судна, эксплуатационная скорость и район плавания.

Сведения о судне носят информационный характер. Эксплуатационная скорость служит основой для выбора расчетной скорости. Указание района плавания позволяет обоснованно выбрать расчетную силу волнения.

2.2 Расчетная нагрузка.

Масса судна Δ , т, координаты центра массы x_G, z_G и момент инерции массы относительно центральной поперечно-горизонтальной оси J_{YG} в расчетном случае нагрузки непосредственно используются в уравнениях движения, а x_G, z_G определяют, кроме того, положение расчетной ватерлинии на тихой воде.

В настоящем расчете, для упрощения, рекомендуется принимать расчетную посадку по КВЛ.

Момент инерции массы относительно центральной поперечно-горизонтальной оси J_{YG} может быть определен (при отсутствии более точных данных) по "эпюре масс" $\frac{\partial m(x)}{\partial x}$ как

$$J_{YG} = 1,01 \int_L \frac{\partial m(x)}{\partial x} (x - x_G)^2 dx, \quad (5)$$

Эпюра масс имеется в реальных расчетах продольной прочности корабля, а в учебном расчете - используется в курсовом проекте по прочности корабля.

Грубо J_{YG} может быть определен по приближенной формуле

$$J_{YG} \approx 0,07 C_w \Delta L^2, \quad (6)$$

где C_w - коэффициент полноты КВЛ.

2.3 Теоретический чертеж и расчеты по статике корабля.

Для выполнения расчетов, связанных с определением коэффициентов гидродинамических сил, в том числе восстанавливающих сил и главной части возмущающих сил, необходимо иметь:

- теоретический чертеж;
- кривые элементов теоретического чертежа (гидростатический кривые);
- масштаб Бонжана (кривые площадей шпангоутов).

Эти материалы используются для построения эпюр

$$\frac{2y(x)}{B}; b(x); \frac{y(x)}{d(x)},$$

а также для определения x_c и C_w .

Требуемые величины могут быть получены с использованием программ ПРОЕКТ-1, STATICA, UP_STAT и др., а в учебном расчете - с использованием результатов, полученных в курсовом проекте по статике корабля.

3 Расчетные условия

В рамках рассматриваемой задачи подлежат выбору:

- скорость хода судна v ;
- курс по отношению к волне c (носом на волну или по волне).

Выбор расчетного волнения тесно связан с выбором расчетной скорости хода, так как на исключительном волнении судно, как правило, не может поддерживать полную скорость хода [22].

Рекомендуется расчетную силу волнения выбирать такой, которая в заданном (предполагаемом) районе плавания имеет долговременную (режимную) обеспеченность не менее 10 %.

Редко повторяющееся волнение большей силы может создать ситуацию, опасную для судна в целом, но мало сказывающуюся на средних

экономических показателях его эксплуатации, поэтому в реальных условиях судоводитель, как правило, идет на снижение скорости хода и другие меры (изменение курса, уход в укрытие), которые позволяют избежать попадания судна в рискованные ситуации. Следовательно, сильное волнение не может служить расчетным.

Сведения о параметрах волнения принятой силы следует выбирать из [23].

Расчетная скорость хода на расчетном волнении с долговременной обеспеченностью 10 % может быть принята равной наибольшей эксплуатационной скорости.

Курс рекомендуется выбирать носом на волну, как представляющий наибольший интерес с точки зрения слеминга и других нежелательных для судна и груза последствий [22].

Расчетный спектр волнения, соответствующий принятому волнению, следует принимать по Ю.А. Нецветаеву - А.И. Вознесенскому [18, 24].

4 Уравнения движения

4.1 Основные допущения. Структура уравнений.

При расчете продольной качки обычных судов (удлиненных - с $\frac{L}{B} > 5$) предполагается, что погонная гидродинамическая нагрузка может быть определена с использованием гипотезы плоских сечений. Считается, что влиянием вязкости на гидродинамические силы при расчете продольной качки можно пренебречь. Силы инерционно-волновой природы описываются в рамках линейной теории качки. Все скорости и ускорения, за исключением скорости хода самого судна, считаются малыми.

В этом приближении на регулярном волнении с полувысотой r_0 , частотой ω и частотой формы (волновым числом) k , ординаты которого описываются формулой

$$z_w = r_0 \cos[\pm kx + \omega t] \quad (7)$$

или, в подвижной системе координат

$$z_w(x) = r_0 \cos[\pm k(x - x_G) + \omega_k t] \quad (8)$$

движение судна описывается линейной системой дифференциальных уравнений [24]:

$$(\Delta + I_{33})\ddot{z}_G + m_{33}\dot{z}_G + rgS_0 z_G - I_{53}\ddot{y} - (m_{53} - \nu I_{33}) - (rgM_{SG} - \nu m_{33}) = r_0 F_c \cos \omega_k t + r_0 F_s \sin \omega_k t; \quad (9)$$

$$(J_{YG} + I_{55})\ddot{y} + (m_{55} + \nu^2 \omega_k^{-2} m_{33})\dot{y} + (rgI_{SG} - \nu^2 I_{33})y - I_{53}\ddot{z}_G - (m_{53} + \nu I_{33})\dot{z}_G - (rgM_{SG} + \nu m_{33})z_G = r_0 M_c \cos \omega_k t + r_0 M_s \sin \omega_k t. \quad (10)$$

В этих уравнениях влияние скорости хода учтено по Ю. В. Ремезу [25].

В уравнениях (9), (10):

- z_G - вертикальное перемещение центра масс ("+" - вверх);

- γ - угол килевой качки ("+" - носом вниз);
- $S_0 = 2 \int_L y_0 dx$; $M_{SG} = 2 \int_L y_0 (x - x_G) dx$; $I_{SG} = 2 \int_L y_0 (x - x_G)^2 dx$ - (11)
- площадь исходной ватерлинии, её статический момент и момент инерции относительно горизонтальной оси, лежащей в вертикальной плоскости, содержащей центр массы судна;
- Δ, J_{YG} - масса корабля и её момент инерции относительно центральной поперечно-горизонтальной оси.

Гидродинамические коэффициенты левой части уравнений (9), (10) определяются как

$$\begin{aligned}
 I_{33} &= \int_L \frac{\partial I_{33}}{\partial x} dx; \quad I_{53} = \int_L \frac{\partial I_{33}}{\partial x} (x - x_G) dx; \quad I_{55} = \int_L \frac{\partial I_{33}}{\partial x} (x - x_G)^2 dx; \\
 m_{33} &= \int_L \frac{\partial m_{33}}{\partial x} dx; \quad m_{53} = \int_L \frac{\partial m_{33}}{\partial x} (x - x_G) dx; \quad m_{55} = \int_L \frac{\partial m_{33}}{\partial x} (x - x_G)^2 dx;
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Коэффициенты возмущающих сил вычисляются по Ю.В. Ремезу [11], [25]:

$$\begin{aligned}
 F_c &= 2 r g \int_L y_0 k_2 \cos k(x - x_G) dx - \\
 &\quad - w \left[w_k \int_L \frac{\partial I_{33}}{\partial x} k_5 \cos k(x - x_G) dx \pm \int_L \frac{\partial m_{33}}{\partial x} k_5 \sin k(x - x_G) dx \right]; \\
 F_s &= \mp 2 r g \int_L y_0 k_2 \sin k(x - x_G) dx - \\
 &\quad - w \left[\mp w_k \int_L \frac{\partial I_{33}}{\partial x} k_5 \sin k(x - x_G) dx + \int_L \frac{\partial m_{33}}{\partial x} k_5 \cos k(x - x_G) dx \right]; \\
 M_c &= -2 r g \int_L y_0 k_2 (x - x_G) \cos k(x - x_G) dx + \\
 &\quad + w \left\{ w_k \int_L \frac{\partial I_{33}}{\partial x} (x - x_G) k_5 \cos k(x - x_G) dx \pm \int_L \frac{\partial m_{33}}{\partial x} (x - x_G) k_5 \sin k(x - x_G) dx - \right. \\
 &\quad \left. - v \left[\mp \int_L \frac{\partial I_{33}}{\partial x} k_5 \sin k(x - x_G) dx + \frac{1}{w_k} \int_L \frac{\partial m_{33}}{\partial x} k_5 \cos k(x - x_G) dx \right] \right\}; \\
 M_s &= \pm 2 r g \int_L y_0 k_2 (x - x_G) \sin k(x - x_G) dx - \\
 &\quad - w \left\{ \pm w_k \int_L \frac{\partial I_{33}}{\partial x} (x - x_G) k_5 \sin k(x - x_G) dx - \int_L \frac{\partial m_{33}}{\partial x} (x - x_G) k_5 \cos k(x - x_G) dx - \right. \\
 &\quad \left. - v \left[\int_L \frac{\partial I_{33}}{\partial x} k_5 \cos k(x - x_G) dx \pm \frac{1}{w_k} \int_L \frac{\partial m_{33}}{\partial x} k_5 \sin k(x - x_G) dx \right] \right\}.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

В этих формулах k_2, k_5 можно определить приближенно, заменяя действительные шпангоуты судна параболическими, с теми же коэффициентами полноты

$$\frac{y(z, x)}{y_0(x)} \approx 1 - \left[\frac{z}{d(x)} \right]^{\frac{b(x)}{1-b(x)}}.$$

Тогда [11]

$$k_2(x) = \frac{b(x)}{[1-b(x)] \left[kd(x) \right]^{\frac{b(x)}{1-b(x)}}} g \left[\frac{b(x)}{1-b(x)}, kd(x) \right], \quad (15)$$

$$k_5(x) = \frac{1}{[1-b(x)] \left[kd(x) \right]^{\frac{1}{1-b(x)}}} g \left[\frac{1}{1-b(x)}, kd(x) \right], \quad (16)$$

где $g(a, u) = \int_0^u e^{-t} t^{a-1} dt$ - неполная гамма-функция, значения которой определяются по таблицам (например, [27]) или по программе L_НАММА.

4.2 Расчет гидродинамических коэффициентов уравнений движения.

Как видно из формул (12), (13), (14), расчет $l_{ij}, m_{ij}, F_{c,s}, M_{c,s}$ может быть выполнен, если предварительно определены функции $\frac{\partial l_{33}}{\partial x}, \frac{\partial m_{33}}{\partial x}$, имеющие смысл погонной присоединенной массы и погонного коэффициента демпфирования при вертикальной качке бесконечного цилиндра с поперечным сечением данного шпангоута.

Рекомендуется определять $\frac{\partial l_{33}}{\partial x}, \frac{\partial m_{33}}{\partial x}$ по материалам А.З. Салькаева. В этом случае:

$$\frac{\partial m_{33}}{\partial x} = \bar{b}_{33} r w_k y_0^2, \quad (17)$$

$$\frac{\partial l_{33}}{\partial x} = \bar{l}_{33} \frac{r}{2} \rho y_0^2, \quad (18)$$

$$\left. \begin{matrix} \bar{b}_{33} \\ \bar{l}_{33} \end{matrix} \right\} = j \left(b(x), \frac{y_0(x)}{d(x)}, \frac{w_k^2 y_0(x)}{g} \right) \quad (19)$$

определяются по графикам [12].

Поскольку по А.З. Салькаеву $\bar{b}_{33}, \bar{l}_{33}$ даны для фиксированных значений коэффициента полноты шпангоута b , равных

$$0,5; 0,6; 0,7; 0,785; 0,8; 0,9; 1,0,$$

то необходима интерполяция по b .

Расчет $\frac{\partial l_{33}}{\partial x}, \frac{\partial m_{33}}{\partial x}$ можно упростить, если вычислять $\bar{b}_{33}, \bar{l}_{33}$ для шпангоутов, имеющих указанные выше значения b . В этом случае расчетные шпангоуты будут не равноотстоящими, и их положение по длине судна будет определяться значением b . Это обстоятельство должно быть учтено при вычислении интегралов, определяющих коэффициенты по формулам (12), (13), (14).

5 Расчет амплитудно- и фазово-частотных характеристик

Задавая в качестве входного процесса ординату волны u центра масс

$$z_w = r_0 \cos w_k t, \quad (20)$$

можно представить решение системы линейных уравнений (9), (10), т.е. выходные процессы, в виде

$$z_G = r_0 \Phi_{rz} \cos(w_k t - e_{rz}), \quad (21)$$

$$y = r_0 \Phi_{ry} \cos(w_k t - e_{ry}), \quad (22)$$

где Φ_{rz}, Φ_{ry} и e_{rz}, e_{ry} - соответствующие амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики.

Для расчета вероятностных характеристик качки достаточно знать только Φ_{rz}, Φ_{ry} . Для их отыскания запишем исходную систему уравнений движения в более компактной форме

$$a_{33}\ddot{z}_G + b_{33}\dot{z}_G + c_{33}z_G + a_{53}\ddot{y} + b_{53}\dot{y} + c_{53}y = r_0 F_c \cos w_k t + r_0 F_s \sin w_k t, \quad (23)$$

$$a_{35}\ddot{z}_G + b_{35}\dot{z}_G + c_{35}z_G + a_{55}\ddot{y} + b_{55}\dot{y} + c_{55}y = r_0 M_c \cos w_k t + r_0 M_s \sin w_k t.$$

Тогда, используя метод комплексных амплитуд [28], можно получить [24]:

$$\Phi_{rz}^2 = \frac{c_0^2 + d_0^2}{a_0^2 + b_0^2}; \quad \Phi_{ry}^2 = \frac{f_0^2 + h_0^2}{a_0^2 + b_0^2} \quad (24)$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= (c_{33} - a_{33}w_k^2)(c_{55} - a_{55}w_k^2) - (c_{53} - a_{53}w_k^2)(c_{35} - a_{35}w_k^2) - (b_{33}b_{55} - b_{53}b_{35})w_k^2; \\ b_0 &= [(c_{33} - a_{33}w_k^2)b_{55} + (c_{55} - a_{55}w_k^2)b_{33} - (c_{53} - a_{53}w_k^2)b_{35} - (c_{35} - a_{35}w_k^2)b_{53}]w_k; \\ c_0 &= (c_{55} - a_{55}w_k^2)F_c - (c_{53} - a_{53}w_k^2)M_c + (b_{55}F_s - b_{53}M_s)w_k; \\ d_0 &= -(c_{55} - a_{55}w_k^2)F_s + (c_{53} - a_{53}w_k^2)M_s + (b_{55}F_c - b_{53}M_c)w_k; \\ f_0 &= (c_{33} - a_{33}w_k^2)M_c - (c_{35} - a_{35}w_k^2)F_c + (b_{33}M_s - b_{35}F_s)w_k; \\ h_0 &= -(c_{33} - a_{33}w_k^2)M_s + (c_{35} - a_{35}w_k^2)F_s + (b_{33}M_c - b_{35}F_c)w_k. \end{aligned} \quad (25)$$

На встречном волнении расчет Φ_{rz}, Φ_{ry} следует вести в диапазоне w_k от нуля до таких значений w_k , при которых Φ_{rz}, Φ_{ry} становятся пренебрежимо малыми (примерно, до $w_k = \frac{5}{\sqrt{d}}$, где d - осадка судна, м).

Число ординат Φ_{rz}, Φ_{ry} , используемых далее при вычислении интегралов по w , должно быть не менее 20.

6 Определение дисперсий и вероятностных характеристик качки

Дисперсии перемещений и скоростей определяются формулами (3). Предварительно необходимо вычислить псевдоспектры перемещений

$$S_z^* = \Phi_{rz}^2(w_k(w))S_r(w), \quad (26)$$

$$S_y^* = \Phi_{ry}^2(w_k(w))S_r(w) \quad (27)$$

и соответствующие псевдоспектры скоростей качки

$$S_z^*(w) = S_z^*(w)w_k^2(w), \quad (28)$$

$$S_y^*(w) = S_y^*(w)w_k^2(w). \quad (29)$$

Затем, выполняя интегрирование псевдоспектров перемещений и скоростей, определяем дисперсии D_z, D_z^*, D_y, D_y^* .

Последний этап - определение вероятностных характеристик качки - выполняется по формулам (1), (2).

Заключение по расчету

В заключении по расчету следует прежде всего дать оценку мореходности судна в отношении продольной качки, дать, при необходимости, рекомендации по улучшению мореходности, а затем отметить все осложнения, встретившиеся в процессе расчета.

Оценка мореходности производится путем сравнения характеристик качки рассматриваемого судна и судов того же типа по статистическим данным [29],[30].

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные допущения положенные в основу системы уравнений продольной качки, полученных Ю.В. Ремезом.

2. Что значит термин «удлиненное судно» в контексте описания способа расчета гидродинамических коэффициентов уравнений продольной качки?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 18455-73. Ветровые волны и зыбь. Термины и определения. - М.: Госстандарт, 1973. - 64 с.
2. Гирс И.В. Испытания мореходных качеств судов. Справочник / И.В. Гирс, А.А. Русецкий, Ю.А. Нецветаев. - Л.: Судостроение, 1977. - 192 с.
3. Справочник по гидрометеорологическим приборам и установкам / А.Б. Рейфер, М.И. Алексеенко, П.Н. Бурцев. - Л.: Гидрометеиздат, 1976. - 432 с.
4. Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. - Л.: Гидрометеиздат, 1977. - 726 с.
5. Справочник по теории корабля. В 3-х т. Т.2 / Под ред. Я. И. Войткунского. - Л.: Судостроение, 1985. - 440 с.
6. Методические указания к лабораторным работам по теории корабля (качка судов) для самостоятельной работы студентов. - Севастополь: КМУ СПИ, 1989.
7. Гернет М.М. Определение моментов инерции / М.М. Гернет, В.Ф. Ратобылский. - М.: Машиностроение, 1969. - 248 с.
8. Фаворин М. В. Моменты инерции тел. Справочник / М.В. Фаворин. - М.: Машиностроение, 1977. - 511 с.
9. Зиньковский-Горбатенко В.Г. К уточнению математической модели неустановившегося движения судна // Сб. Кибернетика на морском транспорте. - Вып. 8. - 1979.
10. International Maritime Organization. Amendments to the Code on Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments. - London, 1999.
11. Ремез Ю.В. Качка корабля / Ю.В. Ремез. - Л.: Судостроение, 1983. - 328 с.
12. Благовещенский С.Н. Справочник по статике и динамике корабля. В 2-х т., Т.2. Динамика (качка) корабля / С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодилин. - Л.: Судостроение, 1975. - 176 с.
13. Павленко Г.Е. Качка судов / Г. Е. Павленко. - Л.: Гострансиздат, 1935. - 312 с.
14. Басин А.М. Качка судов / А. М. Басин. - М.: Транспорт, 1969. - 272 с.
15. Методические указания к лабораторным работам по качке судов. - Севастополь: КМУ СПИ, 1972.
16. Благовещенский С.Н. О вычислении главной части возмущающего момента при боковой качке корабля на регулярном волнении // Труды НТО Судпрома. - Л.: Судпромгиз, 1957. - Т. VII. - Вып. 2. - С. 133 - 148
17. Благовещенский С.Н. Справочник по теории корабля / С.Н. Благовещенский. - Л.: Судпромгиз, 1950. - 568 с.
18. РД 5.1003-80 Методика расчета качки водоизмещающих кораблей и судов. - 191 с.
19. Салькаев А.З. Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. - Вып. 235.

20. Салькаев А.З. Расчет гидродинамических сил, действующих на регулярном волнении на суда с большим отношением ширины к осадке // Судостроение.- 1980. - № 4. - С.19 - 21.

21. Салькаев А.З. Определение гидродинамических характеристик бортовой и вертикальной качки. В сб: Управляемость и мореходность судов. Труды НТО Судпрома. - Л.: Судостроение, 1969. - Вып.126. - С.155 - 166.

22. Липис В.Б. Безопасные режимы штормового плавания судов / В.Б. Липис, Ю.В. Ремез. - М.: Транспорт, 1982. - 117 с.

23. Регистр СССР. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные. - Л.: Транспорт, 1974. - 360 с.

24. Прикладные задачи динамики судов на волнении / Под ред. И.К. Борода. - Л.: Судостроение, 1989. - 264 с.

25. Ремез Ю.В. О расчете передаточных функций килевой качки корабля // Доклад на НТК НКИ и НТО Судпрома, 1963.

26. Басин А.М. Гидродинамика судов на мелководье / А.М. Басин, И.О. Веледницкий, А.Г. Ляховитский. - Л.: Судостроение, 1976. - 320 с.

27. Слуцкий Е.Е. Таблицы для вычисления неполной Г-функции и функции вероятности s^2 / Е.Е. Слуцкий. - М.-Л.: Изд. АН СССР, 1950. - 70 с.

28. Корн Г. Справочник по высшей математике для научных работников и инженеров / Г.Корн, Т. Корн. - М.: Наука, 1977. - 840 с.

29. Ногид Л. М. Остойчивость судна и его поведение на взволнованном море / Л.М. Ногид. - Л.: Судостроение, 1967.

30. Шмырев А.Н. Успокоители качки судов / А.Н. Шмырев, В.А. Мореншильдт, С.Г. Гольдин. - Л.: Судостроение, 1972. - 480 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

BUBSORT

Руководство пользователя

ВАРИАЦИОННЫЙ РЯД КРИТЕРИЙ СОГЛАСИЯ КОЛМОГОРОВА - СМИРНОВА

Программа осуществляет сортировку произвольного набора чисел, упорядочивая их в порядке возрастания. Если исходная выборка является реализацией случайной величины, то результат сортировки представляет собой вариационный ряд.

Программа предоставляет возможность проверки согласия вариационного ряда и типовых моделей функций распределения с помощью критериев согласия Колмогорова - Смирнова.

В данной версии программы предусмотрена возможность проверки согласия вариационного ряда и следующих типовых функций распределения:

- экспоненциального;
- нормального;
- логнормального;
- Вейбулла;
- Гумбеля;
- Фреше;
- Релея.

Параметры функций распределения могут либо вводиться по запросу программы, либо вычисляться самой программой.

Если Вы располагаете требуемой информацией, то, ответив положительно на запрос программы

«Вы располагаете соответствующей информацией (Y/N) »

Получаете приглашение

«Введите :

- наименование элементов выборки и их размерность »

«Укажите число сортируемых элементов N = »

Затем вводится выборка.

Выборка выводится на экран для контроля и, если не требуется правки, программа вычисляет статистики E и D2.

Программа сортировки образует вариационный ряд и выдает запрос о необходимости вывода вариационного ряда на экран:

«Выводить вариационный ряд на экран ? (Y/N)».

При положительном ответе упорядоченная выборка выводится на экран.

Затем программа выполняет поиск меры уклонения DM и IM для всех типовых распределений.

Программа предлагает выполнить оценку критерий согласия:

«Выполнить оценку критерия согласия по Колмогорову ? (Y/N) »

и, при положительном ответе предлагает указать уровень значимости

из числа обычно принимаемых в статистических расчетах уровней.

«Укажите, для какого уровня значимости вычислять критерий согласия:

0,20;

0,10;

0,05;

0,02;

0,01. »

Запросив направление вывода

«Вывод на экран (E) или на принтер (P) ? (E/P) =»

программа предлагает

«Вы можете высказать гипотезу относительно модели ?»

и, при положительном ответе, предлагает указать модель распределения.

Далее следует вывод на экран (или на принтер):

Наименование выборки;

Параметры распределения: $E = \dots$

Распределение-модель ...;

Критерий согласия Колмогорова-Смирнова

при уровне значимости $\alpha = \dots$: $K(N, \alpha) = \dots$

$D_n = \dots$, в точке $I = \dots$

Вы удовлетворены ? (Y/N));

Продолжать при другой модели распределения ? (Y/N));

В случае обнаружения в выборке элемента, который не может принадлежать распределению заданного типа, об этом делается сообщение.

Иначе, если нет предположений о модели, выполняется расчет статистики Колмогорова-Смирнова при уровне значимости $\alpha = \dots$: $K(N, \alpha) = \dots$ для всех моделей распределения с указанием, для каждой модели : наибольшего отклонения и номера соответствующего элемента.

Результаты выдаются на экран или на принтер.

Затем следует служебный запрос «Продолжать для других выборок?

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ROLLING

Руководство пользователя

Работа с программой ROLLING.

После запуска программы открывается краткая справка о программе, с указанием потребных для её работы данных и запросом об их наличии у пользователя.

Далее вводятся:

Код объекта

Вариант расчета ...

Вариант загрузки ...

Данные по судну (см. работу 5)

После ввода требуемой информации следует запрос о том вычислять ли вероятностные характеристики качки или ограничиться расчетом гидродинамических коэффициентов. В данной работе нужно выбрать первую возможность.

Далее выбирается вид расчетного спектра волнения (пять вариантов) и указывается, с какой обеспеченностью следует вычислять амплитуды качки (четыре варианта). В соответствии с РД 5.1003-80, нужно принять 3%-ю обеспеченность (которой соответствует $K_q = 2,64$ в (1)).

Программа позволяет выполнять расчет либо под заданный момент инерции массы судна относительно центральной продольной оси J_{xG} , либо под заданную частоту собственных малых колебаний бортовой качки w_q . Первый вариант используется при предвычислении качки в проектных расчетах, и рекомендуется в данной работе. Второй используется при наличии данных о собственной частоте бортовых колебаний для уже существующего судна (период качки известен из акта кренования судна).

Вычислить J_{xG} можно по одной из приближенных формул. Рекомендуется воспользоваться формулой Дуайера

$$J_{xG} = \frac{\Delta}{12} (B^2 + 4z_G^2), \text{ т} \cdot \text{м}^2.$$

При задании момента инерции программа выполняет расчет частоты малых собственных колебаний и коэффициента демпфирования (волнового), и выдает их, для справки, на экран.

Знание частоты собственных колебаний позволяет пользователю ориентироваться в выборе частоты максимума спектра волновых ординат, наиболее опасного с точки зрения получения больших амплитуд качки.

Далее следует запрос о необходимости введения поправок на вязкость и трехмерность. При положительном ответе предлагаются четыре возможности - либо предоставить программе вычисление вязкостных поправок по данным испытаний Vugts'a, либо по обобщенным данным РД 5.1003-80, либо ввести поправки с клавиатуры – по данным испытаний модели рассматриваемого судна (при этом предусмотрено использование ре-

зультатов двух вариантов испытаний – методом свободных и методом вынужденных колебаний). В данной работе нужно воспользоваться данными РД 5.1003-80.

Затем следует запрос о том, как строить дальнейший расчет в отношении момента инерции массы судна $J_{ХГ}$.

Затем вводятся данные о волнении - высоте волн 3%-й обеспеченности $h_{3\%}$ и частоте максимума спектра волновых ординат w_M . Если нет специальных указаний, то для судов неограниченного района плавания принимается высота волн $h_{3\%} = 11$ м, а для судов ограниченных районов плавания - не ниже предписанных Правилами Регистра, т.е. $h_{3\%} = 8,5$ м для I ограниченного района, $h_{3\%} = 7$ м - для II, $h_{3\%} = 6$ м - для II СП, $h_{3\%} = 3,5$ м - для III СП.

Соответствующие значения w_M могут быть приняты по указаниям РД 5.1003-80 (или по [12, с.311-313]), однако следует иметь в виду, что указания РД ориентированы на оценку качки на часто встречающемся волнении, а не на качку в наиболее опасных, хотя и редко встречающихся условиях.

После ввода данных по волнению следует запрос о необходимости вычисления вероятностных характеристик ускорений и нагрузок на крепления грузов. В данной работе можно ответить отрицательно.

После этого программа выполняется и следует графический вывод на экран, содержащий исходные данные и результаты расчета.

Вывод осуществляется в безразмерной форме, принятой в ROLLING. Результаты распечатываются с помощью Paint или PaintShopPro.

Протокол работы программы, кроме входных данных и рассмотренных выше результатов расчета, содержит сведения о частотах собственных колебаний при бортовой и вертикальной качке и коэффициентах затухания собственных колебаний при вертикальной качке и бортовой качке с учетом влияния поперечно-горизонтальной.

Кроме того, приводятся амплитудно-частотные характеристики всех трех видов поперечной качки и расчетный спектр волнения.

Библиографический список (к Приложению Б)

1. Герасимов А.В. Статистическая линеаризация сопротивления бортовой качке / А.В. Герасимов // Судостроение. - 1971. - № 4.
2. Басин А.М. Качка судов / А. М. Басин. - М.: Транспорт, 1969.
3. Луговский В.В. Нелинейные задачи мореходности корабля / Луговский В.В. - Л.: Судостроение, 1966.
4. Семенов-Тян-Шанский В.В. Качка корабля / Семенов-Тян-Шанский В.В., Благовещенский С.Н., Холодилин А.Н. - Л.: Судостроение, 1969.
5. ОСТ 5.1003-80. Методика расчета качки водоизмещающих кораблей и судов ский В.В.- Л.: Судостроение, 1980.

6. Салькаев А.З. Гидродинамические силы, действующие на контур произвольной формы, плавающий на поверхности тяжелой жидкости / А.З. Салькаев // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. - 1967. - Вып. 235.

7. Салькаев А.З. Определение гидродинамических характеристик бортовой и вертикальной качки / А.З. Салькаев // Управляемость и мореходность судов. - Л.: Судостроение. - Вып.126.

8. Салькаев А.З. Расчет гидродинамических сил, действующих на регулярном волнении на суда с большим отношением ширины к осадке / А.З. Салькаев // Судостроение. - 1980. - № 9.

9. Мореншильдт В.А. Исследование влияния положения центра тяжести и особенностей форм корабля на бортовую качку / В.А.Мореншильдт // Тех. информация №78. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. - Л.: Судостроение, 1955.

10. Vugts J.H. The Hydrodynamic Coefficients for Swaying, Heaving and Rolling Cylinders in a Free Surface / J.H. Vugts // ISP. - 1968. - 15.- N 167.

11. Справочник по теории корабля. В 3-х т. Т. 2 / Под ред. Я.И. Войткунского. - Л.: Судостроение, 1985.

Учебное издание

Морева Ирина Николаевна

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ. КАЧКА СУДОВ

*Методическое пособие
к выполнению лабораторных работ*

В авторской редакции

Изд. № 283/2020. Объем 3,5 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»