



Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям № 1-5 по дисциплине
«Специальные разделы теории корабля» для студентов
специальности 7.100201
– «Корабли и океанотехника» всех форм обучения

Севастополь
2006



УДК 609.12:532

Методические указания к практическим занятиям № 1-5 по дисциплине «Специальные разделы теории корабля» для студентов специальности 7.100201 – «Корабли и океанотехника» всех форм обучения / Сост. Зинковский-Горбатенко В.Г. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006.- с.

Целью настоящих методических указаний является оказание помощи студентам в выполнении практических заданий по дисциплине Специальные разделы теории корабля.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры Океанотехники и кораблестроения " ____ " _____ 2003 г., протокол № ____

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент: канд.техн.наук, доцент Новиков А.И.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3.
1. Практическое занятие №1. Экстерьер судна. Элементы парусности и погруженной части диаметрали	5
2. Практическое занятие №2. Элементы движительно-рулевого комплекса	8
3. Практическое занятие №3. Диаграмма управляемости	12
4. Практическое занятие №4. Угол крена судна на циркуляции	31
5. Практическое занятие №5. Эффективность рулевого устройства	33
Библиографический список	39

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Рекомендуемые значения диаметра циркуляции и площади рулей	40
--	----

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

Элементы судов для практических и расчетно-графических заданий (индивидуальные задания)	41
---	----

ВВЕДЕНИЕ

Управляемость судна относится к его важнейшим мореходным качествам. Маневренные качества судна призваны обеспечивать не только безопасность плавания, но и защиту окружающей среды. Среди навигационных аварий, аварии судов, связанные с недостаточной маневренностью или её утратой, занимают все более серьезное место.

Этому способствует рост размеров судов и широкое использование морского транспорта для перевозки опасных грузов.

Печальные последствия гибели танкера TORREY CANYON со 117 тыс. т нефти на борту, половина которой вытекла в море и залила сотню километров пляжей у побережья Корнуэлла, когда танкер разломился пополам на скале Поллард Рок в 1967 г., вынудили международную морскую общественность не только интенсифицировать исследования в области управляемости судов, но и разрабатывать нормы маневренности (IMO, Resolution 160, 1968; MSC/Circ.644, 1994; MSC/Circ.137(76), 2002).

Учебным планом специалистов и магистров специальности 7.100201 – «Корабли и океанотехника» изучение управляемости судов предусматривается на последнем, завершающем курсе обучения, после того как на предыдущих курсах изучены другие разделы теории корабля и получены определенные навыки в постановке и решении задач динамики корабля. Соответствующая информация и программное обеспечение активно используются при изучении управляемости судна.

Тематика практических занятий охватывает основные разделы курса и позволяет, при успешном выполнении практических работ, освоить основные приемы самостоятельного выполнения расчетов управляемости.

Все расчеты выполняются для одного судна, характеристики которого указываются в индивидуальном задании (практическое занятие №1) согласно ПРИЛОЖЕНИЮ Б. В целом выполненные расчеты позволяют получить требуемые оценки управляемости заданного судна.

Таблица Б8 - Л е д о к о л ы

∇ , м ³	31250		15625		7813	
v_S , узл	21,0	18,0	19,5	17,0	18,0	16,0
L , м	153,6	149,2	120,3	117,1	94,0	91,7
B , м	31,45	30,19	26,00	24,97	21,51	20,70
d , м	12,38	11,89	10,00	9,60	8,09	7,78
C_B	0,522	0,583	0,499	0,556	0,478	0,529
C_W	0,719	0,749	0,708	0,736	0,697	0,722
C_M	0,840	0,882	0,826	0,843	0,814	0,844
$\frac{x_C}{L} 100$, %	-3,22	-1,17	-4,11	-2,02	-5,02	-2,98
i_E , градусы	11,6	14,6	11,2	13,9	10,8	13,1
Шифр варианта	ЛК10	ЛК9	ЛК8	ЛК7	ЛК6	ЛК5
Ф.И.О. (Подпись)						

Продолжение таблицы Б8

∇ , м ³	3906		1953	
v_S , узл	16,5	15,0	15,0	14,0
L , м	73,3	71,7	56,9	36,0
B , м	17,79	17,19	14,70	14,31
d , м	6,54	6,32	5,29	5,15
C_B	0,458	0,501	0,441	0,474
C_W	0,688	0,708	0,680	0,695
C_M	0,801	0,828	0,790	0,812
$\frac{x_C}{L} 100$, %	-5,89	-4,04	-6,67	-5,20
i_E , градусы	10,6	12,4	10,4	11,8
Шифр варианта	ЛК4	ЛК3	ЛК2	ЛК1
Ф.И.О. (Подпись)				

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1 ЭКСТЕРЬЕР СУДНА. ЭЛЕМЕНТЫ ПАРУСНОСТИ И ПОГРУЖЕННОЙ ЧАСТИ ДИАМЕТРАЛИ

Цель Практического занятия №1 – изучение требований к надводной и подводной части судна, связанных с обеспечением его управляемости, и создание, на этой основе математической модели судна

Математическая модель судна, используемая в расчетах управляемости, должна:

- фиксировать все, существенные для задач управляемости, параметры формы надводной и подводной части судна, характеристики распределения его массы;
- соответствовать принятым в настоящее время архитектурным типам судов соответствующего назначения и размеров;
- учитывать требования Правил ОТНК (Регистра), международных конвенций и соглашений;
- соответствовать исходным данным индивидуального Задания.

Расчет управляемости носит поверочный характер. Поэтому необходимой частью расчета является предварительная оценка элементов управляемости, а также определение используемых в расчете характеристик парусности судна и подводной части его диаметрали и руля.

Требуемые расчеты выполняются на ПЭВМ с применением компьютерных программ EXTERIOR, AREA, TURN, RV и др.

Содержание работы –

Разработка силуэта и вида с носа надводной части судна

Применительно к силуэту (вид сбоку) и виду анфас (вид с носа) из числа указанных выше требований к математической модели относятся требования к учету:

- формы надводной части в оконечностях,
- наличия и расположения надстроек, рубок и фальшборта,
- наличия крупногабаритного палубного груза (штабелей контейнеров на контейнеровозах, колесной техники на накатных судах, лесного груза - на лесовозах и т.п.),
- возвышения ходового мостика и протяженности его крыльев (до бортов),
- расположения мачт для несения ходовых огней (МППСС-72 с поправками),
- наличия и размещения крупногабаритного оборудования (большого числа дефлекторов - на накатных и накатных пас-

- сажирских судах, палубных грузоподъемных кранов и т.п.),
- высоты надводного борта до верхней палубы, высоты борта в носу (в соответствии с Правилами о грузовой марке [2])

В частности, при разработке силуэта и вида с носа должны быть учтены следующие требования Правил по оборудованию морских судов [1]:

- с крыльев ходового мостика должен быть виден борт судна, т.е., крылья должны доходить до бортов судна;
- возвышение ходового мостика должно быть таково, чтобы с поста управления была видна водная поверхность, начиная с расстояния от носа в 2L или 500 м, смотря по тому, что меньше;
- с крыла мостика должен быть обеспечен обзор в носу от ДП до направления на 45° на противоположный борт;

расстояние между топовыми огнями должно быть не менее $L/2$ (и не более 100 м), и они должны быть отдельно видны с уровня моря, начиная с расстояния в 1000 м от носа судна, причем задний топовый должен быть виден выше переднего, и располагаться на судне выше переднего не менее, чем на 4,5 м

1. Исходные данные

- 1.1. Тип судна _____
- 1.2. Район плавания* _____
- 1.3. Категория ледовых усилений по Правилам Российского Морского Регистра Судоходства* _____
- 1.4. Водоизмещение в грузу, т _____ $\Delta =$ _____
- 1.5. Абсцисса центра тяжести, м: _____ $x_G =$ _____
- 1.6. Плотность воды, т·м⁻³ _____ $\rho =$ _____
- 1.7. Размерения и посадка в грузу
 - 1.7.1 Длина между перпендикулярами*, м $L_p =$ _____
 - 1.7.2 Длина по ЛГВЛ, м _____ $L_{wl} =$ _____
 - 1.7.3 Длина по «Правилам о грузовой марке»*, L = _____
 - 1.7.4 Ширина, м _____ B = _____
 - 1.7.5 Высота борта, м _____ D = _____
 - 1.7.6 Осадка на мидель-шпангоуте, м _____ d = _____
 - 1.7.7 Осадка носом*, м _____ $d_f =$ _____
 - 1.7.8 Осадка кормой*, м _____ $d_a =$ _____
- 1.8. Коэффициенты полноты в грузу
 - 1.8.1 Общей полноты _____ $C_B =$ _____
 - 1.8.2 Продольной полноты _____ $C_P =$ _____
 - 1.8.3 Полноты мидель-шпангоута _____ $C_M =$ _____
- 1.9 Число валов * _____ $Z_P =$ _____
- 1.10 Число рулей * _____ $Z_R =$ _____
- 1.11 Расчетная скорость хода, уз _____ V = _____

$\nabla, \text{м}^3$	7813		3906		1953	
$v_S, \text{узл}$	20,5	16,0	19,0	15,0	17,5	14,0
$L, \text{м}$	103,0	98,0	79,2	75,3	60,7	57,7
$B, \text{м}$	20,39	18,85	16,75	15,43	13,77	12,65
$d, \text{м}$	7,64	7,06	6,27	5,78	5,16	4,74
C_B	0,487	0,600	0,470	0,582	0,453	0,564
C_W	0,712	0,769	0,702	0,760	0,694	0,751
C_M	0,898	0,991	0,857	0,959	0,806	0,903
$\frac{x_C}{L} 100, \%$	-4,608	-0,719	-5,374	-1,211	-6,122	-1,754
$i_E, \text{градусы}$	10,6	16,3	10,4	16,1	10,4	16,0
Шифр варианта	Б12	Б11	Б10	Б9	Б8	Б7
Ф.И.О. (Подпись)						

Продолжение таблицы Б7

$\nabla, \text{м}^3$	977		488		244	
$v_S, \text{узл}$	16,0	13,0	14,5	12,0	13,0	11,0
$L, \text{м}$	46,4	44,1	35,3	33,6	26,8	25,5
$B, \text{м}$	11,32	10,40	9,29	8,56	7,60	7,05
$d, \text{м}$	9,24	3,89	3,45	3,20	2,85	2,64
C_B	0,439	0,547	0,428	0,530	0,422	0,514
C_W	0,687	0,742	0,681	0,733	0,678	0,725
C_M	0,749	0,847	0,688	0,805	0,664	0,785
$\frac{x_C}{L} 100, \%$	-6,800	-2,340	-7,340	-2,944	-7,656	-3,540
$i_E, \text{градусы}$	10,5	16,0	10,7	16,0	11,2	16,3
Шифр варианта	Б6	Б5	Б4	Б3	Б2	Б1
Ф.И.О. (Подпись)						

Таблица Б6 - Промысловые суда

∇ , м ³	3906		1953	
v_S , узл	14,0	12,0	12,7	11,0
L , м	80,2	77,0	62,0	59,5
B , м	14,72	14,39	11,80	11,56
d , м	5,58	5,45	4,59	4,50
C_B	0,594	0,647	0,581	0,632
C_W	0,766	0,795	0,760	0,786
C_M	0,949	0,958	0,928	0,941
$\frac{x_C}{L} 100$, %	-0,871	0,477	-1,236	0,117
i_E , градусы	12,3	19,4	15,0	18,8
Шифр варианта	TP8	TP7	TP6	TP5
Ф.И.О. (Подпись)				

Продолжение таблицы Б.6

∇ , м ³	977		488	
v_S , узл	11,3	10,0	10,0	9,0
L , м	47,7	45,8	36,4	35,1
B , м	9,46	9,29	7,46	7,35
d , м	3,79	3,72	3,17	3,13
C_B	0,572	0,617	0,567	0,606
C_W	0,755	0,779	0,753	0,772
C_M	0,901	0,916	0,866	0,884
$\frac{x_C}{L} 100$, %	-1,514	-0,232	-1,660	-0,540
i_E , градусы	15,0	18,5	15,2	18,2
Шифр варианта	TP4	TP3	TP2	TP1
Ф.И.О. (Подпись)				

Таблица Б7 -

Б у к с и р ы

Содержание отчета о работе

1. Чертежи силуэта с подводной частью диаметральной и вида с носа судна разрабатываются в соответствии с изложенными выше рекомендациями и требованиями Правил и приводятся в отчете.

2. Координаты узловых точек контура силуэта судна и погруженной части диаметральной (без руля и гребных винтов) снимаются с чертежа и вносятся в соответствующие таблицы.

3. Расчет площади парусности A_{VL} и площади погруженной части диаметральной A_L с координатами их центров, при указанной в исходных данных посадке d_A, d_F , а также при посадке, соответствующей полностью погруженному рулю, выполняется по программе EXTERIOR.

Результаты расчета представляются в виде документа EXTERIOR.

4. Вид с носа обрабатывается программой AREA.

Примечание

Отмеченные в исходных данных знаком (*) величины выбираются исполнителем в результате проработки специальной литературы по проектированию судов рассматриваемого типа и архитектурной проработки заданного варианта судна.

Контрольные вопросы

1. Какие требования Правил по оборудованию судов, связанные с обеспечением управляемости и безопасности плавания Вы знаете?
2. Какие требования Правил о грузовой марке влияют на размещение поста управления и наблюдения на судне?
3. Какие требования МППСС-72 связаны с размещением сигнальных огней и мачт судна?

2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2.

3.

ЭЛЕМЕНТЫ ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВОГО КОМПЛЕКСА

Цель работы

Оценка и обоснование элементов движительно-рулевого комплекса судна.

Содержание работы

Конструкторская проработка элементов движительно-рулевого комплекса судна.

Вторым (после разработки экстерьера судна и определения характеристик его парусности и подводной части диаметрали) этапом расчета управляемости является конструкторская проработка элементов винто-рулевого комплекса.

Элементы винто-рулевого комплекса определяются в процессе последовательных приближений. В первом приближении должны быть оценены:

- значения относительного диаметра установившейся циркуляции, требуемые Правилами и опытом эксплуатации для судов рассматриваемого типа;
- соответствующая относительная площадь руля (рулей);
- число винтов предельного диаметра, способных переработать с приемлемым КПД мощность ГЭУ, требуемую для обеспечения заданной скорости хода;
- число и размещение рулей относительно гребных винтов;
- тип руля (в терминах Правил) и число опор руля (и баллера).

Предварительная оценка элементов управляемости, а также определение сопротивления судна и упора гребного винта выполняется на ПЭВМ с использованием программ TURN, RV и Pn.

Задание к практическому занятию 2

1. Оценить требуемый для рассматриваемого судна диаметр установившейся циркуляции и площадь руля, обеспечивающую требуемый диаметр циркуляции;
2. Определить основные характеристики гребного комплекса с учетом опыта эксплуатации и ограничений Правил;
3. Определить основные геометрические характеристики руля;
4. Разработать чертеж винто-рулевого комплекса.

Исходные данные приведены в практическом задании № 1

Таблица Б4

Накатные суда

∇ , м ³	31250		15625		7813	
v_S , узл	25,0	21,0	21,0	18,5	17,0	16,0
L , м	183,6	178,6	141,7	138,5	108,0	106,6
B , м	30,82	29,29	23,93	23,19	18,55	18,34
d , м	10,17	9,67	7,90	7,65	6,12	6,05
C_B	0,543	0,618	0,583	0,636	0,637	0,660
C_W	0,740	0,779	0,761	0,789	0,789	0,802
C_M	0,957	0,968	0,963	0,970	0,970	0,973
$\frac{x_C}{L} 100$, %	-2,48	-2,06	-1,17	0,22	0,24	0,75
i_E , градусы	11,4	15,2	13,5	16,7	17,1	19,0
Шифр варианта	PO6	PO5	PO4	PO3	PO2	PO1
Ф.И.О. (Подпись)						

Таблица Б.5

Лихтеровозы

∇ , м ³	62500	
v_S , узл	21,0	18,0
L , м	231,6	225,0
B , м	33,95	33,24
d , м	11,71	11,46
C_B	0,679	0,729
C_W	0,812	0,838
C_M	0,975	0,980
$\frac{x_C}{L} 100$, %	1,1	1,8
i_E , градусы	17,8	22,6
Шифр варианта	ЛИ2	ЛИ1
Ф.И.О. (Подпись)		

Таблица Б.3 Пассажирские суда

$\nabla, \text{м}^3$	62500		31250		15625	
$v_S, \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	30,0	24,0	27,2	22,0	24,4	20,0
$L, \text{м}$	277,3	268,8	217,3	210,4	169,8	164,3
$B, \text{м}$	35,55	33,40	28,25	26,56	22,37	21,10
$d, \text{м}$	11,45	10,77	9,42	8,85	7,72	7,28
C_B	0,553	0,646	0,541	0,631	0,533	0,619
C_W	0,745	0,794	0,739	0,786	0,735	0,780
C_M	0,946	0,962	0,943	0,960	0,942	0,958
$\frac{x_C}{L} 100, \%$	-2,135	-0,446	-2,550	-0,116	-2,820	-0,180
$i_E, \text{градусы}$	9,06	13,1	8,47	12,5	8,6	12,1
Шифр варианта	П12	П11	П10	П9	П8	П7
Ф.И.О. (Подпись)						

Продолжение таблицы Б.3

$\nabla, \text{м}^3$	7813		3906		1953	
$v_S, \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	21,6	18,0	18,8	16,0	16,0	14,0
$L, \text{м}$	132,1	127,8	102,3	98,3	78,5	76,1
$B, \text{м}$	17,65	16,74	13,86	13,26	10,83	10,49
$d, \text{м}$	6,30	5,98	5,13	4,41	4,16	4,03
C_B	0,532	0,611	0,537	0,606	0,552	0,607
C_W	0,734	0,775	0,737	0,773	0,745	0,773
C_M	0,941	0,956	0,943	0,956	0,945	0,956
$\frac{x_C}{L} 100, \%$	-2,884	-0,406	-2,683	-0,525	-2,173	-0,498
$i_E, \text{градусы}$	8,6	11,8	9,0	11,9	9,7	12,2
Шифр варианта	П6	П5	П4	П3	П2	П1
Ф.И.О. (Подпись)						

Порядок выполнения расчетов.

1. Относительный диаметр установившейся циркуляции

Относительный диаметр установившейся циркуляции $\frac{D_{ц}}{L}$, с точки

зрения безопасности мореплавания, не должен превышать $\frac{D_{ц}}{L} = 4$ - по

Правилам [3] и $\frac{D_{ц}}{L} = 5$ - по ИМО (для судов более 100 м длиной и всех нефтяных танкеров, химовозов и газовозов) [6].

С другой стороны, эксплуатационные требования к судам некоторых типов могут быть существенно более жесткими [7]. Так, для буксиров требуется иметь $\frac{D_{ц}}{L} = 1,5 \dots 2$.

Следует учитывать, что в отдельных случаях эксплуатационные требования относятся не к относительному диаметру циркуляции, а к абсолютному её значению (пожарные суда, сейнера, китобойцы).

2. Оценка площади пера руля и основных элементов движительно-рулевого комплекса

Оценка требуемой площади пера руля (рулей) A_R , м^2 , производится двумя путями:

- 1) использованием статистических данных об относительной площади пера руля $\frac{A_R}{Ld}$ для судов рассматриваемого типа [4, 5, 7], совместно с рекомендациями относительно значений диаметра циркуляции $\frac{D_{ц}}{L}$ при полной перекладке руля, приведенными в руководствах по проектированию судов конкретного типа;
- 2) использованием регрессионных зависимостей для элементов циркуляции, полученных из результатов испытаний самоходных моделей, от площади пера руля и характеристик корпуса судна и его движительно-рулевого комплекса при перекладке руля на борт на 35° [8] и программа TURN).

Для оценки A_R по экспериментальным данным, представленным в виде регрессионных зависимостей в [8], и реализованных в программе TURN, необходимо знать число гребных валов Z_p и число рулей Z_R ,



выбрать тип руля (простой, полуподвесной или подвесной), определить площадь выступающей за носовой перпендикуляр части диаметрали АВ, и подготовить следующие данные:

$$Z_P; Z_R; \text{тип руля}; \frac{L}{B}; \frac{d_A - d_F}{L}; \frac{AB}{Ld}; \frac{V}{\sqrt{L}}.$$

Площадь АВ предварительно вычисляется программой AREA.

В процессе счета по программе TURN варьируется $\frac{A_R}{Ld}$ до получения удовлетворительных оценок относительного диаметра установившейся циркуляции $\frac{D_{ц}}{L}$.

Таким образом, предварительное значение площади пера руля A_R устанавливается по статистическим и экспериментальным данным.

3. Число валов, число рулей. Диаметр винтов

Большинство судов, как известно, имеет один винт и один руль, устанавливаемый за гребным винтом в его струе.

Однако мощность ГЭУ, обеспечивающая заданную скорость хода крупных и быстроходных судов, в некоторых случаях не может быть переработана одним винтом из-за ограничения диаметра винта по условиям виброактивности ([9], 2.10.2.2) и технологичности, а также в связи с требованиями к прочности гребного винта (Правила, ч.УП, 6.2) и предотвращения его возможного кавитационного разрушения.

Число винтов, необходимое для обеспечения их безкавитационной работы (при предельном дисковом отношении винта, равном единице) может быть оценено по формуле

$$Z_P \geq \frac{1,5 + 0,35Z}{(p_A + p_{gh_s} - p_v)D_p^2} \cdot \frac{P_s \eta_D \eta_s}{(1 - t)v} + 0,2.$$

Расчеты сопротивления судна, коэффициентов взаимодействия, мощности двигателя выполняются с использованием комплекса программ Rv, Pn и сведений из [10,11,12].

Напомним, что мощность главных механизмов, требуемая в соответствии с заданной категорией ледовых усилений (Правила, ч.УП, 2.1), может превышать мощность, требуемую для обеспечения заданной скорости хода.

4. Винто-рулевой комплекс. Общий вид

С учетом выполненных выше оценок и проектной документации по судам-аналогам, выбирается тип руля (из числа регламентируемых Правилами, ч.П, рис. 2.2.4.1) и разрабатывается чертеж общего вида движительно-рулевого комплекса.

При разработке чертежа должно быть учтено, что размеры и размеще-

$\nabla, \text{м}^3$	500000		250000		125000	
$v_s, \text{узл}$		15,0	15,5	14,5	16,0	14,0
$L, \text{м}$		364,0	304,4	299,7	254,0	246,2
$B, \text{м}$		64,98	49,83	49,80	38,95	38,84
$d, \text{м}$		25,59	19,93	19,92	15,58	15,53
C_B		0,839	0,827	0,841	0,811	0,842
C_W		0,900	0,893	0,901	0,884	0,901
C_M		0,998	0,998	0,998	0,997	0,998
$\frac{x_C}{L} 100, \%$		2,27	2,29	2,26	2,30	2,26
$i_E, \text{градус}$		46,2	41,3	45,1	36,0	43,8
Шифр варианта		T11	T10	T9	T8	T7
Ф.И.О. (подпись)						

Продолжение таблицы Б.2

$\nabla, \text{м}^3$	62500		31250		15625	
$v_s, \text{узл}$	16,5	13,5	17,0	13,0	17,5	12,5
$L, \text{м}$	211,5	201,7	175,8	164,9	145,8	134,5
$B, \text{м}$	30,56	30,34	24,09	23,74	19,08	18,61
$d, \text{м}$	12,22	12,14	9,63	9,50	7,63	7,44
C_B	0,791	0,842	0,766	0,841	0,736	0,839
C_W	0,872	0,901	0,859	0,900	0,842	0,899
C_M	0,996	0,998	0,994	0,998	0,991	0,998
$\frac{x_C}{L} 100, \%$	2,26	2,26	2,14	2,26	1,89	2,27
$i_E, \text{градус}$	30,6	42,5	25,6	40,8	21,0	39,3
Шифр варианта	T6	T5	T4	T3	T2	T1
Ф.И.О. (подпись)						

Таблица Б1 - Сухогрузы универсальные

$\nabla, \text{м}^3$	15625		7812,5		3906,3	
$v_s, \text{узл}$	18,0	20,5	16,5	18,5	15,0	16,5
$L, \text{м}$	131,6	134,9	105,8	108,3	84,6	86,4
$B, \text{м}$	20,51	21,13	16,44	16,86	13,17	13,44
$d, \text{м}$	8,55	8,80	6,74	6,91	5,31	5,42
C_B	0,677	0,623	0,667	0,619	0,660	0,620
C_W	0,811	0,782	0,805	0,780	0,801	0,780
C_M	0,975	0,970	0,980	0,970	0,979	0,970
$\frac{x_C}{L} 100, \%$	1,06	-0,09	0,88	-0,18	0,74	-0,16
$i_E, \text{градус}$	16,6	14,8	17,8	14,5	17,2	14,5
Шифр варианта	C11	C10	C9	C8	C7	C6
Ф.И.О. (подпись)						

Продолжение таблицы Б.1

$\nabla, \text{м}^3$	1953,1		976,6		488,3	
$v_s, \text{узл}$	13,5	14,5	12,0	12,5	10,5	
$L, \text{м}$	67,3	68,54	53,2	53,8	41,7	
$B, \text{м}$	10,56	10,70	8,46	8,52	6,79	
$d, \text{м}$	4,19	4,25	3,31	3,33	2,61	
C_B	0,656	0,627	0,656	0,640	0,661	
C_W	0,799	0,784	0,799	0,791	0,802	
C_M	0,978	0,971	0,978	0,974	0,979	
$\frac{x_C}{L} 100, \%$	0,66	0,00	0,66	0,31	0,76	
$i_E, \text{градус}$	17,1	15,0	17,3	16,1	18,1	
Шифр варианта	C5	C4	C3	C2	C1	
Ф.И.О. (подпись)						

Таблица Б2 Т а н к е р а и н е ф т е р у д о в о з ы

ние гребного винта относительно корпуса судна и руля должны удовлетворять требованиям ч. II, п. 2.10.2.2 Правил Регистра [9].

В результате проработки устанавливаются:

диаметр гребного винта D_p ,

высота пера руля h_R ,

площадь пера руля A_R ,

площадь части пера руля, попадающая в струю гребного винта в непереложном положении A_{RDP} ,

а также вычисляется относительное удлинение руля $\lambda_R = \frac{h_R^2}{A_R}$.

Расчет площадей A_R и A_{RDP} выполняется по программе AREA.

Площадь A_{RDP} определяется как площадь руля в пределах струи гребного винта. Высота части пера руля, попадающей в струю h_{RDP} , принимается равной диаметру струи $D_B(x_B)$. Приблизительно

$$h_{RDP} \approx D_p.$$

Содержание отчета по работе.

Отчет содержит обоснования и результаты оценок по п. 1-4, документированные результаты работы использованных компьютерных программ, а также чертеж общего вида винто-рулевого комплекса.

Контрольные вопросы

1. Перечислите эксплуатационные требования и требования Правил и Стандартов маневренности судов ИМО к диаметру установившейся циркуляции рассматриваемого Вами судна
2. Каковы рекомендуемые значения относительной площади пера руля для рассматриваемого судна.
3. Какие ограничения накладывают Правила Регистра на размещение гребного винта относительно корпуса и руля? Чем они вызваны?
4. Удалось ли Вам удовлетворить требования Правил? Какие затруднения встретились при этом?

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

ДИАГРАММА УПРАВЛЯЕМОСТИ

Цель работы –

- получение навыков расчета управляемости судна на тихой воде и анализа полученных результатов.

Оценка управляемости судна на тихой воде сводится к расчету и построению т.н. "диаграммы управляемости" и "корпусной диаграммы", их последующему анализу и проверке удовлетворения требований Правил и хорошей морской практики.

В расчетах, в основном, используется методика, изложенная в "Справочнике по теории корабля", т.3, под редакцией Я. И. Войткунского [4].

Содержание работы

- Расчет характеристик управляемости на тихой воде

Характеристики управляемости на тихой воде –

- относительный или абсолютный диаметр циркуляции при полной перекладке руля и
- относительный диаметр самопроизвольной циркуляции при непереложном руле),

полученные расчетом, должны быть приемлемы для обычных условий эксплуатации судов рассматриваемого типа и размеров (длины или водоизмещения).

В Заключении по работе, при необходимости, приводятся рекомендации по улучшению управляемости на тихой воде.

Задание к практическому занятию 3

1. Рассчитать и построить диаграмму управляемости судна и корпусную диаграмму.
2. Сделать заключение об управляемости судна по относительному диаметру (безразмерной угловой скорости) самопроизвольной циркуляции при непереложном руле и по относительному диаметру установившейся циркуляции при руле, переложном на борт на наибольший угол.

Исходные данные, приведенные в задании на Практическое занятие 1, дополняются следующими результатами выполненных в предыдущих работах оценок:

1.12 Площадь погруженной части диаметрала, m^2

$A_L =$ _____

1.13 Площадь руля, m^2 , _____ $A_R =$ _____

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ЭЛЕМЕНТЫ СУДОВ

ДЛЯ
ПРАКТИЧЕСКИХ И РАСЧЕТНО_ГРАФИЧЕСКИХ ЗАДАНИЙ
(Индивидуальные задания)

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ
ДИАМЕТРА ЦИРКУЛЯЦИИ И ПЛОЩАДИ РУЛЕЙ

Таблица А1 - Приемлемые значения относительного диаметра установившейся циркуляции*

Типы судов	$D_{ц}/L$
Быстроходные грузовые суда	3,0 – 4,0
Танкеры	3,5 – 4,5*
Пассажирские лайнеры	3,5 – 4,5*
Каботажные суда	2,5 – 3,0
Буксиры	1,5 – 2,0

*) По Правилам Российского Морского Регистра Судоходства – не более 4,0. По стандартам мореходности ИМО 2002 – не более 5.

Таблица А2 - Рекомендуемые относительные площади рулей

Типы судов	$100A_R / Ld$
<i>Морские суда</i>	
Одновинтовые	1,6 – 1,9
Двухвинтовые:	
- с одним рулем	1,5 – 2,1
- с двумя рулями (суммарная площадь рулей)	2,1
Нефтеналивные	1,3 – 1,9
Крупные быстроходные пассажирские	1,2 – 1,7
Малые быстроходные пассажирские	1,8 – 2,0
Каботажные	2,3 – 3,3
Суда, обладающие повышенными маневренными качествами	2,4 – 4,0
Рыболовные и гидрографические	2,5 – 5,5
Морские буксиры	3,0 – 6,0
Парусные	2,0 – 3,0
Лоцманские суда и паромы	2,5 – 4,0
<i>Речные суда</i>	
Пассажирские	4,0 – 8,0
Сухогрузные	3,0 – 7,0
Буксиры	6,5 – 13,0
Баржи и шаланды	4,5 – 7,0
Понтоны	8 и более
Катера	4,0 – 12,0

1.14 Высота части пера руля, расположенной в корму от оси его вращения, м $h_R =$ _____

1.15 Плечо приложения боковой силы на руле относительно ЦТ, м $l_R =$ _____

Порядок расчета

1 Диаграмма управляемости

Диаграмма управляемости строится для случая движения судна на установившейся циркуляции на тихой воде. Расчет выполняется для ряда заданных углов перекладки.

Уравнения движения судна в случае малых углов дрейфа β можно записать в следующем виде [14]:

$$\Delta v \omega \beta - \frac{\rho}{2} A_L v^2 \left[C_{x\beta} + C_x \left(\beta, \frac{\omega L}{v} \right) \right] = T_E;$$

$$\Delta v \omega - \frac{\rho}{2} A_L v^2 \left[C_{y\beta} + C_y \left(\beta, \frac{\omega L}{v} \right) \right] =$$

$$Y_p - \frac{\rho}{2} A_{RE} v^2 C_{YR}^\alpha \left[\delta_R - k_E \left(\beta + \frac{\omega l_R}{v} \right) \right];$$

$$- \frac{\rho}{2} A_L v^2 \left[C_{m\beta} + C_m \left(\beta, \frac{\omega L}{v} \right) \right] =$$

$$- Y_p l_p + \frac{\rho}{2} A_{RE} l_R v^2 C_{YR}^\alpha \left[\delta_R - k_E \left(\beta + \frac{\omega l_R}{v} \right) \right];$$

где обозначено:

- Y_p - боковая сила на гребном винте;
- l_p - плечо приложения этой силы относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести судна.

1.1 Силы на корпусе

Коэффициенты сил на корпусе обычно принимаются (при $\beta > 0$) как

$$\left[C_{x\beta} + C_x \left(\beta, \frac{\omega L}{v} \right) \right] = -C_v;$$

$$\left[C_{y\beta} + C_y \left(\beta, \frac{\omega L}{v} \right) \right] = C_{y\beta}^\beta \beta + C_2 \beta^2;$$

$$\left[C_{M\beta} + C_M \left(\beta, \frac{\omega L}{v} \right) \right] = C_{M\beta}^{\beta} \beta - C_{M\omega}^{\omega} \frac{\omega L}{v}$$

В первом из этих уравнений принято

$$\frac{R(v, \beta, \omega)}{\frac{\rho}{2} A_L v^2} \approx \frac{Z_P T_E(v)}{\frac{\rho}{2} A_L v^2} = C_v.$$

Значения коэффициентов гидродинамических сил на корпусе определяются по результатам испытаний модели судна в циркуляционном и опытовом бассейнах. Приближенно, по Г. В. Соболеву [13]

$$C_{Y\beta}^{\beta} = \pi \left(\frac{d}{L} \right) \left(\frac{0,65}{C_p} \right)^{5/2} \left(\frac{L}{6B} \right)^{1/3} + (\sigma_d - 0,96);$$

$$C_2 = 0,72 \left(\frac{3d}{B} \right)^{1/2} \left(\frac{0,7}{C_p} \right)^{3/2} + 1,25(\sigma_d - 0,95);$$

$$C_{M\beta}^{\beta} = 1,8 \frac{d}{L} + 0,6(0,7 - C_p) + (0,97 - \sigma_d);$$

$$C_{M\omega}^{\omega} = \left(0,05 + 0,58 \frac{d}{L} \right) \sigma_d^4,$$

где: $C_p = \frac{C_B}{C_M}$ - коэффициент продольной полноты;

σ_d - приведенный коэффициент полноты погруженной части диаметра. Принимается равным:

- для судов с утолщенным дейдвудом

$$\sigma_d = 0,962 + 0,054 \frac{L}{d} (\psi_1 + \psi_2)$$

- для судов с сигарообразной кормой

$$\sigma_d = 0,975 + 0,054 \frac{L}{d} (\psi_1 + \psi_2)$$

- для судов с хорошо выраженным дейдвудом (в виде скега)

$$\sigma_d = 1 - \frac{3}{20-i} \cdot \frac{A_A}{Ld} + 0,054 \frac{L}{d} (\psi_1 + \psi_2).$$

Библиографический список

1. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила по оборудованию морских судов / СПб.: Российский Морской Регистр Судоходства, 2005.- 329 с
2. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила о грузовой марке морских судов / СПб.: Российский Морской Регистр Судоходства, 2005.- 329 с.
3. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации и постройки морских судов / СПб.: Российский Морской Регистр Судоходства, 2005.- 482 с. (ч. III).
4. Справочник по теории корабля. В 3-х т. Т 3 / Под ред. Я. И. Войткунского.- Л.: Судостроение, 1985.- 544 с.
5. Гофман А. Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник/ А. Д. Гофман.- Л.: Судостроение, 1988.- 360 с.
6. International Maritime Organization. Standards for Ship Manoeuvrability/IMO, Resolution MSC.137(76) adopted 5 December 2002.- London
7. Кацман Ф. М. Конструирование винто-рулевых комплексов морских судов/Ф. М. Кацман, Г.М. Кудреватый.- Л.: Судостроение, 1974.- 376 с
8. Lyster C. F., Knight H. L. Prediction equation for ship turning circles. Tr. N. E. Coast Inst. Eng. and Shipbuild. 1979.
9. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации и постройки морских судов/СПб.: Российский Морской Регистр Судоходства, 2005- 482 с. (ч. II).
10. Артюшков Л. С. Судовые движители/ Л. С. Артюшков, А.Ш Ачкинадзе, А. А. Русецкий.-Л.: Судостроение, 1988.- 296 с.
11. Сопротивление движению судов и движители. Методические указания к практическим занятиям №1-8 по дисциплине «Статика и динамика» для студентов специальности 7.100201 «Корабли и океанотехника» всех форм обучения. Ч.2. Севастополь, СевНТУ, 2005.- 60 с.
12. Справочник по теории корабля. В 3-х т. Т 1 / Под ред. Я.И.Войткунского.- Л.: Судостроение, 1985.- 766 с.
13. Соболев Г. В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения/ Г. В. Соболев.- Л.: Судостроение, 1976.- 478 с
14. Зиньковский-Горбатенко В. Г. Управляемость корабля. Курс лекций. (рукопись)

тивности E_1, E_2, E_3 ?

2. Какими мероприятиями проектно-конструкторского характера можно снизить значения требуемых нормативных эффективностей E_1, E_2, E_3 ?
3. На суда каких районов плавания распространяются требования Правил ?
4. Какие последствия ожидают судовладельца и проектанта в случае неудовлетворения судном требований Стандартов маневренности судов ИМО 2002 ?

В этих формулах:

Ψ_1 - сумма статического и конструктивного дифферента (при $\Psi_1 \neq 0$ площадь A_A и длина по ватерлинии L должны определяться для посадки судна по равнообъемной ватерлинии, параллельной линии киля);

Ψ_2 - ходовой дифферент Ψ_2 ; определяется по [4, рис.П. 6] в зависимости от x_G / L и числа Фруда $\frac{V_0}{\sqrt{gL}}$. При

$\frac{V_0}{\sqrt{gL}} < 0,3$ можно принять $\Psi_2 = 0$ (дифферент на корму считается положительным).

i - номер "переходного" шпангоута между U - и V - образными шпангоутами (при 20 шпангоутах и нумерации шпангоутов от носа к корме);

1.2 Силы на руле

Силы на руле на практике определяются по различным методикам [4,13], применение которых приводит к заметно отличающимся результатам.

Согласно методике Р.Я.Першица [4 с.76 и далее] гидродинамические силы на руле определяются как

$$X_R = C_{XR}(\alpha_R) \frac{\rho}{2} A_{RE} v^2$$

$$Y_R = C_{YR}(\alpha_R) \frac{\rho}{2} A_{RE} v^2,$$

где: α_R - угол атаки руля; на малых углах дрейфа β

$$\alpha_R = \delta_R - \kappa_E \left(\beta \cdot \text{sign}(\delta_R) + l_R \frac{L\omega}{v} \right), \text{ а}$$

$$C_{XR}(\alpha_R) \approx C_{XR}(0); \quad C_{YR}(\alpha_R) = C_{YR}^\alpha \alpha_R.$$

A_{RE} - приведенная площадь пера руля; на переднем ходу, определяется по Р.Я.Першицу как

$$A_{RE} = z_R (A_R + A_{RDP} C_{TA}),$$

где C_{TA} - коэффициент нагрузки гребного винта (определение C_{TA} - см ниже).

Скорость потока для части пера руля, попадающей в струю гребного

винта, принимается равной

$$v_R = v(1 - W)(1 + W_{BB}),$$

где W_{BB} - относительная вызванная скорость в струе гребного винта

$$W_{BB} = \frac{1}{2} k_X \cdot (\sqrt{1 + C_{TA}} - 1)$$

при

$$k_X = \left(1 + \frac{2x_B / D_B}{\sqrt{1 + \left(2x_B / D_B \right)^2}} \right)$$

Ближе к действительности оценка A_{RE} , получаемая по приведенной ниже формуле, которая учитывает зависимость приведенной площади пера руля как от C_{TA} , так и от расстояния между диском гребного винта и передней кромкой руля (коэффициент k_X):

$$A_{RE} = z_R \left\langle A_R + A_{RDP} \left\{ \left[1 + \frac{k_X}{2} (\sqrt{1 + C_{TA}} - 1) \right]^2 - 1 \right\} \right\rangle ;$$

в практических расчетах следует принимать $k_X = 1,1$.

В приведенных выше формулах:

δ_R - угол перекадки руля (положительный - на правый борт);

β - угол дрейфа (положительный - при набегании потока с левого борта);

ω - угловая скорость, c^{-1} (положительная - по часовой стрелке);

l_R - плечо приложения боковой силы Y_R относительно вертикальной оси, проходящей через центр массы судна, м;

K_E - приведенный коэффициент влияния корпуса и гребного винта на направление набегающего на руль потока

$$K_E = K \cdot K_{DP}$$

Коэффициент K учитывает влияние корпуса и определяется экспериментально или по данным близких прототипов, поскольку существенно зависит от особенностей формы обводов в корме и геометрии движительно-рулевого комплекса. Приближенно может быть оценен по [4].

Коэффициент K_{DP} для всех рулей, кроме рулей за рудерпостом, принимается равным (по Першицу):

где $\lambda_p = \frac{h_p^2}{A}$ - для всех рулей, кроме рулей типов IY, X, XIII

$$\lambda_p = \frac{h_p^2}{A_k} \text{ - для рулей типов IY, X, XIII.}$$

Значения E_3 определяются как

$$E_3 = \begin{cases} 0,03 + 0,01(\lambda_p - 1) + 0,01 \frac{A_5}{A_2} \left(1 - 3 \frac{x}{L_1} \right), L \geq 70\text{м}; \\ 0, L < 70\text{м} \end{cases} \quad (5)$$

Однако, для всех судов (кроме спасательных, рыболовных судов и буксиров с $\sigma_k > 0,865$), если $E_1 > \begin{cases} E_2 \\ E_3 \end{cases}$, допускается принимать

$E_1 = 0$, если диаметр установившейся циркуляции судна при руле, переложеном на 35° будет

$$D_{\pi} \leq 4L, \quad (6)$$

а диаметр самопроизвольной циркуляции при непереложеном руле

$$D_c \geq 6,7D_{\pi}. \quad (7)$$

Условия (6), (7) должны проверяться испытаниями модели судна.

Для судов с водоизмещением при осадке по ЛГВЛ $\Delta > 60000$ т проверка условий (6),(7) испытаниями модели судна обязательна.

Содержание отчета по работе 5

1. Анализ применимости требований Правил к эффективности рулевого устройства рассматриваемого судна.
2. Идентификация типа руля
3. Расчет используемых в Правилах величин.
4. Определение эффективности рулевого устройства судна.
5. Вычисление нормативных значений эффективности.
6. Оценка степени удовлетворения требований Правил
7. Заключение по работе.

В Заклучении по результатам расчета должно быть ясно указано удовлетворяются ли требования Правил или нет, и высказаны соображения о причинах и предложения по улучшению управляемости судна в последнем случае.

Контрольные вопросы по работе 5

1. Каким расчетным ситуациям соответствуют нормативные эффек-

деляется по формуле

$$E_{PP} = 1,3\mu_2 \frac{A_k}{A_2} (1 - W)^2, \quad (2)$$

где

$$\mu_2 = \frac{6,28 \sqrt{\frac{b_p}{b_k}}}{1 + \frac{2b_k^2}{A_k}} + \frac{1,4C_{HB}}{1 + 0,5 \left(\frac{b_k^2}{A_k} \right)^2}.$$

В последних формулах:

A_k - суммарная площадь руля и кронштейна или рудерпоста, расположенная в пределах h_p ;

b_p - ширина пера руля, м;

b_k - суммарная ширина пера руля и рудерпоста, м.

3. Нормы эффективности

Значение эффективности рулевого устройства, вычисленное по формуле (1) или (2), рассматривается как фактическое значение эффективности для данного судна.

Оно должно быть не менее нормативных значений эффективности E_1, E_2, E_3 :

E_1 - назначенной исходя из условий устойчивости на курсе и поворотливости в тихую погоду;

E_2, E_3 - обеспечивающих приемлемую управляемость судна на ходу при ветре как на свободной воде (по углу дрейфа), так и в канале (по боковому смещению).

Значения E_1 определяются по графикам Правил [3, рисунки 2.10.3.3-1, 2.10.3.3-2, 2.10.3.4] как

$$E_1 = F(\sigma_K, C_p). \quad (3)$$

Значения E_2 вычисляются по формуле

$$E_2 = \frac{3,8A_3}{V^2 A_4} \left(1 - 0,0667 \frac{A_3}{A_4} \right) \times \left\{ 1 + (\lambda_p - 1) [0,33 + 0,015(V - 7,5)] - 5 \frac{x_0}{L_1} \right\} \quad (4)$$

$$\kappa_{DP} = \frac{Z_R}{A_{RE}} (A_R + A_{RDP} (\sqrt{1 + C_{TA}} - 1)),$$

или, более точно

$$\kappa_{DP} = \frac{Z_R}{A_{RE}} \left\{ (A_R - A_{RDP}) + A_{RDP} \left[1 + \frac{k_x}{2} (\sqrt{1 + C_{TA}} - 1) \right] \right\}$$

а для рулей за рудерпостом - по [4, рис Y.6].

Необходимые для оценки упора гребного винта коэффициенты взаимодействия винта и корпуса t, W_T обычно определяются по результатам эксперимента или по приближенным формулам [10]. Значения t, W_T представляются в общем виде как

$$\left. \begin{matrix} t \\ W_T \end{matrix} \right\} = f \left(K_{DE}, \frac{D_p}{d} \right), \text{ где } K_{DE} = v D_p \sqrt{\frac{\rho}{T_E}}.$$

Тяга гребного винта $T_E(v, \beta)$ может быть оценена как тяга на прямом курсе при скорости, равной скорости на циркуляции

$$T_E(v) = T_E(0) - (T_E(0) - T_E(v_0)) \frac{v}{v_0} = T_E(v_0) \left[1 - k_T \left(\frac{v}{v_0} - 1 \right) \right],$$

где $T_E(v_0) = \frac{R(v_0)}{Z_p}$, а скорость v равна скорости на циркуляции

$$v = \left(\frac{v}{v_0} \right) \cdot v_0.$$

Соппротивление судна на тихой воде $R(v_0)$ может быть найдено компьютерной программой Rv .

Поскольку на установившейся циркуляции сопротивление судна равно тяге гребного комплекса, то приближенно можно определить коэффициент нагрузки гребного винта при заданном угле перекадки руля (и соответствующей скорости на циркуляции) следующим образом:

- по известной (из предыдущих расчетов по программе TURN) относительной скорости на установившейся циркуляции находим скорость

$$v = \left(\frac{v}{v_0} \right) \cdot v_0.$$

Расчетная тяга на прямом курсе находится как

$$T_E(v_0) = \frac{R(v_0)}{Z_p},$$

затем определяется и тяга на циркуляции при скорости v как

$$T_E(v) = T_E(v_0) \left[1 - k_T \left(\frac{v}{v_0} - 1 \right) \right].$$

Коэффициент диаметра-тяги будет равен

$$K_{DE} = v D_p \sqrt{\frac{\rho}{T_E}}.$$

По K_{DE} можно найти коэффициенты взаимодействия t, W_T - либо по результатам испытаний, либо, приближенно, по рекомендуемым формулам для рассматриваемого типа судов [10].

Коэффициент нагрузки гребного винта поле этого найдется по формуле

$$C_{TA} = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{T_E(v)}{\rho D_p^2 (1-t)(1-W_T)^2 v^2},$$

затем можно определить A_{RE} для каждого значения угла перекладки руля.

Заметим, что в расчетах используется относительная приведенная площадь пера руля

$$\bar{A}_{RE} = \frac{A_{RE} L}{\nabla}.$$

Далее, необходимо задать плечо приложения боковой силы I_R на руле, определяемое как расстояние от баллера руля до центра тяжести судна.

В расчетах используется относительное плечо боковой силы $\bar{I}_R$

$$\bar{I}_R = \frac{I_R}{L}.$$

Градиент коэффициента боковой силы на руле C_{YR}^α определяется по результатам экспериментов. Приближенно принимается:

$$\begin{aligned} & \text{по Прандтлю} \quad C_{YR}^\alpha = c_R \frac{2\pi\lambda_R}{2 + \lambda_R}; \\ & \text{по К. К. Федяевскому} \quad C_{YR}^\alpha = c_R \frac{2\pi\lambda_R}{2 + \sqrt{\lambda_R^2 + 4}}, \end{aligned}$$

где $c_R = 1$ - для прямоугольных и подвесных (трапецевидных) рулей;

$$c_R = 0,78 - \frac{4}{15}(\lambda_R - 1,25) + \frac{8}{225}(\lambda_R - 1,25)^2 -$$

геометрическому смыслу от полученных EXTERIOR, пересчитываются к требуемому виду и вносятся в таблицу исходных данных.

2. Эффективность рулевого устройства

Эффективность рулевого устройства, в соответствии с Правилами [3] проверяется, к удовлетворению Регистра, для судов длиной более 20 м (кроме ледоколов) неограниченного и ограниченного 1 района плавания, имеющих следующие геометрические характеристики:

$$\begin{aligned} L_1/B &= 3,2...8,0; & C_B &= 0,45...0,85; \\ L_1/d &= 8,3...28,6; & C_p &= 0,55...0,85; \\ B/d &= 1,5...3,5; & \sigma_k &= 0,80...0,99. \end{aligned}$$

Коэффициент продольной полноты

$$C_p = \frac{C_B}{C_M},$$

а коэффициент полноты кормовой подводной части диаметрали

$$\sigma_k = 1 - \frac{2(f - f_0)}{L_1 d}$$

(f_0 - вводится для двухвинтовых судов; равно площади проекции выкружек гребных валов на площадь f).

Эффективность рулевого устройства для рулей всех типов, кроме IY, X, XIII определяется по формуле

$$E_p = \mu_1 \frac{A}{A_2} \left(1 + C_{HB} \frac{A_B}{A} \right) (1 - W)^2, \quad (1)$$

$$\text{где } \mu_1 = \frac{6,28}{1 + \frac{2A}{h_p^2}},$$

$W = 0,3C_B$ - для руля в ДП за гребным винтом;

$W = 0$ - для руля в ДП при отсутствии гребного винта перед ним;

$W = 0,4C_B - 0,13$ - для бортовых рулей;

$$C_{HB} = \frac{9,38T}{[D_B v(1 - W)]^2}, \text{ причем, для рулей, не работающих непосредственно за гребным винтом, } C_{HB} = 0.$$

Эффективность рулевого устройства для рулей типов IY, X, XIII опре-

Эффективность рулевого устройства для рулей типов IY, X, XIII опре-

1. Исходные данные

Исходные данные, приведенные в задании к Практическому занятию № 1, дополняются для обеспечения настоящего расчета следующими:

Размерения, посадка, параметры формы

- Длина между перпендикулярами, м $L_p =$ _____
- Длина по ЛГВЛ, м $L_1 =$ _____
- Длина по «Правилам о грузовой марке», м $L =$ _____
- Площадь боковой проекции подзора, м² $f =$ _____
- Площадь подводной части диаметрала при осадке по ЛГВЛ, м² $A_2 =$ _____
- Площадь боковой парусности при той же осадке, м² $A_5 =$ _____
- Расстояние от середины длины L_1 до центра тяжести площади A_5 , м $x =$ _____
- Площадь подводной части диаметрала при минимальной осадке, соответствующей полному погружению руля, м² $A_4 =$ _____
- Площадь боковой парусности при той же осадке, м² $A_3 =$ _____
- Расстояние от середины длины L до центра тяжести площади A_3 , м $x_0 =$ _____
- Коэффициенты полноты при осадке по ЛГВЛ
 - Общей полноты $C_B =$ _____
 - Продольной полноты $C_P =$ _____
 - Полноты мидель-шпангоута $C_m =$ _____
- Наибольшая скорость хода при осадке по ЛГВЛ, уз $V =$ _____
- Упор гребного винта при скорости V , кН $T =$ _____
- Площадь пера руля, м² $A =$ _____
- Площадь пера руля, находящаяся в струе гребного винта в непереложенном положении, м² $A_b =$ _____
- Средняя высота части пера руля в корму от оси его вращения, м $h_p =$ _____
- Тип руля (рис. 2.2.4.1. ч. III Правил) _____

(Силуэт судна с подводной частью диаметрала разрабатывается и приводится в отчете в отчете по работе № 1).

Расчет площади парусности A_{VL} и площади погруженной части диаметрала A_L с координатами их центров, при указанных в исходных данных посадках, выполняется и документируется программой EXTERIOR.

Величины, указанные в перечне исходных данных, и отличающиеся по

для полуподвесных.

Приведенный коэффициент влияния корпуса и гребного винта

$$\kappa_E = \kappa \cdot \kappa_{DP},$$

где
$$\kappa_{DP} = \frac{z_R}{A_{RE}} \left(A_R + A_{RDP} \left(\sqrt{1 + C_{TA}} - 1 \right) \right)$$

1.3 Уравнения движения

Уравнения движения, после перехода к безразмерной форме путем деления первых двух уравнений п.1 на $\frac{\rho \nabla v^2}{2L}$, а третьего уравнения - на $\frac{\rho \nabla v^2}{2}$, и введения обозначений

$$\frac{\omega L}{v} = \bar{\omega}, \quad \bar{A}_L = \frac{A_L L}{\nabla} \quad \text{и} \quad A_{RE} C_{YR}^\alpha = \bar{E},$$

упрощаются и принимают вид

$$\begin{aligned} 2 \bar{\omega} \beta + C_v \bar{A}_L = 2 \bar{T}_E; \\ 2 \bar{\omega} - \bar{A}_L (C_{Y\beta}^\beta \beta + C_2 \beta^2) = -\bar{E} \left[\delta_R - \kappa_E \left(\beta + \bar{I}_R \bar{\omega} \right) \right]; \\ - \bar{A}_L \left(C_{M\beta}^\beta \beta - C_{M\omega}^\omega \bar{\omega} \right) = \bar{E} \bar{I}_R \left[\delta_R - \kappa_E \left(\beta + \bar{I}_R \bar{\omega} \right) \right]. \end{aligned}$$

(в первом из уравнений учтено, что $\Delta \equiv \rho \nabla$).

Теперь из последних двух уравнений непосредственно следует выражение, позволяющее построить корпусную диаграмму - зависимость угла дрейфа β от безразмерной угловой скорости $\bar{\omega}$:

$$\bar{\omega} = \bar{A}_L \beta \frac{\left(\bar{I}_R C_{Y\beta}^\beta + C_{M\beta}^\beta \right) + \bar{I}_R C_2 \beta}{2 \bar{I}_R + \bar{A}_L C_{M\omega}^\omega}$$

Для получения диаграммы поворотливости (управляемости), т.е. зависимости безразмерной угловой скорости $\bar{\omega}$ от угла перекадки руля δ_R , - необходимо из тех же уравнений исключить β .

Собирая члены уравнений при $\bar{\omega}$, $\bar{\beta}$ и $\bar{\beta}^2$, и обозначив

$$a = 2 - \bar{E} k_E \bar{I}_R;$$

$$b = \bar{A}_L C_{Y\beta}^\beta + \bar{E} \kappa_E$$

$$c = \bar{A}_L C_2;$$

$$e = \bar{A}_L C_{M\omega}^\omega + \bar{E} \kappa_E \left(\bar{I}_R \right)^2;$$

$$f = \bar{A}_L C_{M\beta}^\beta - \bar{E} \kappa_E \bar{I}_R,$$

получим расчетную систему:

$$a \bar{\omega} - b \bar{\beta} - c \bar{\beta}^2 = -\bar{E} \delta_R;$$

$$e \bar{\omega} - f \bar{\beta} = \bar{E} \bar{I}_R \delta_R.$$

Исключив из этой системы $\bar{\beta}$, будем иметь

$$A \left(\bar{\omega} \right)^2 - B \bar{\omega} - C = 0;$$

и, следовательно,

$$\bar{\omega} = \frac{B \pm \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A},$$

При $B < 0$, во избежание потери точности, $\bar{\omega}$ следует вычислять по формуле:

$$\bar{\omega} = -\frac{2C}{B - \sqrt{B^2 + 4AC}}.$$

В последних трех уравнениях обозначено:

$$A = c \left(\frac{e}{f} \right)^2;$$

$$B = B_1 + B_2 \delta_R,$$

где $B_1 = a - b \frac{e}{f}; \quad B_2 = 2c \frac{\bar{I}_R \bar{E}}{f} \frac{e}{f}.$

5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РУЛЕВОГО УСТРОЙСТВА

Цель работы

Ознакомление с требованиями Правил к эффективности рулевого устройства и усвоение процедуры расчета эффективности по Правилам.

Управляемость судна при современном уровне знаний и возможностей экспериментальной техники на этапе проектирования оценивается приближенно. Между тем, управляемость судна является основным мореходным качеством, обеспечивающим безопасность мореплавания, а не только безопасность плавания конкретного судна. В особенности это относится к судам, перевозящим опасные грузы, и крупным судам с большой полнотой обводов. В связи с этим в мировой практике управляемость каждого построенного судна проверяется во время сдаточных испытаний. Именно так построены требования ИМО, изложенные в "Стандартах маневренности судов" [6].

В соответствии с требованиями «Правил классификации и постройки морских судов Российского Морского Регистра Судоходства» [3], управляемость судна проверяется на этапе проектирования сравнением расчетных показателей управляемости с нормативными.

Таким образом, к настоящему времени не выработано единого подхода к нормированию управляемости, более того, "Правила Регистра" и "Стандарты маневренности судов" существенно разнятся между собой в методическом плане.

В настоящей работе рассматриваются требования Правил Регистра.

Нормы эффективности рулевого устройства по Правилам приходится рассматривать как минимальные. Фактические значения характеристик управляемости (относительный или абсолютный диаметр циркуляции при полной перекладке руля и относительный диаметр самопроизвольной циркуляции при непереложном руле) должны быть приемлемы для обычных условий эксплуатации судов рассматриваемого типа.

Работа 5 завершается Заключением об эффективности рулевого устройства и приемлемости эксплуатационных характеристик управляемости. При необходимости приводятся рекомендации по улучшению управляемости до уровня, требуемого Правилами.

Определение используемых в расчете характеристик парусности судна и подводной части его диаметрали, сопротивления движению судна и упора гребного винта может быть выполнено на компьютере с использованием программ EXTERIOR, AREA, TURN, RV, Pn и др.



вышать (с учетом крена от скопления пассажиров у борта) $\theta_{\text{доп}}^{\circ} = 8^{\circ}$.

При $\theta_{\text{уст}}^{\circ} > \theta_{\text{доп}}^{\circ}$ допустимую скорость хода при выходе на циркуляцию можно оценить как

$$V_{\text{доп}} = V_0 \sqrt{\frac{\theta_{\text{доп}}^{\circ}}{\theta_{\text{уст}}^{\circ}}}.$$

Содержание отчета по работе

1. Идентификация применимых требований Правил и рекомендаций из опыта эксплуатации судов рассматриваемого типа
2. Расчет вспомогательных величин
3. Оценка угла крена на циркуляции и (при необходимости) допустимой скорости хода при выходе на циркуляцию
4. Заключение

В Заключении по расчету угла крена на циркуляции должно быть отмечено выполнение применимых требований Регистра и соответствие опыту эксплуатации судов рассматриваемого типа.

Контрольные вопросы к работе 4

1. В каком периоде циркуляции наблюдается наибольший угол крена? Насколько больше он может быть, чем угол крена на установившейся циркуляции?
2. Какие требования к углу крена на циркуляции пассажирских судов предъявляют Правила Регистра (ч. IV, Остойчивость)? Чем отличается формула Правил 2003 г. от формулы Г. А. Фирсова?

$$C = (C_I - C_{II} \delta_R) \delta_R,$$

при
$$C_I = b \frac{\bar{I}_R \bar{E}}{f} + \bar{E}; \quad C_{II} = c \left(\frac{\bar{I}_R \bar{E}}{f} \right)^2.$$

Расчет вспомогательных параметров осуществляется в таблице 1.

Расчет диаграммы управляемости сводится в таблицу 2.

Полученные в таблице 2 оценки V/V_0 позволяют уточнить C_{TA} и выполнить, при необходимости, последующие приближения.

Перед построением диаграммы управляемости предварительно следует определить характерные точки этой диаграммы - угловую скорость самопроизвольной циркуляции (циркуляции при непереложенном руле) и т.н. «первую критическую точку диаграммы управляемости», определяющую нормируемую ИМО ширину петли диаграммы управляемости (если она существует), а также вычислить относительный диаметр самопроизвольной циркуляции.

1.4 Угловая скорость и относительный диаметр самопроизвольной циркуляции

Угловая скорость самопроизвольной циркуляции $\bar{\omega}_c$, т. е. циркуляции при непереложенном руле, находится из уравнения

$$A \left(\bar{\omega}_c \right)^2 - B_1 \bar{\omega}_c = 0,$$

вытекающего из $A \left(\bar{\omega} \right)^2 - B \bar{\omega} - C = 0$ при $\delta_R = 0$.

Таким образом $\bar{\omega}_{c1} = 0$:

$$\bar{\omega}_{c2} = \frac{B_1}{A}.$$

При выполнении расчета $\bar{\omega}_c$ коэффициенты уравнений следует вычислять, положив $V \approx V_0$.

Физический смысл имеет только случай $\bar{\omega}_c \geq 0$, поэтому при от-

рицательном значении ω_{c2} угловая скорость самопроизвольной циркуляции принимается равной нулю.

При положительном значении ω_c относительный диаметр самопроизвольной циркуляции находится по формуле

$$\frac{D_c}{L} = \frac{2}{\omega_c}.$$

В соответствии с Правилами должно выполняться условие

$$\frac{D_c}{L} \geq 6,7 \frac{D_{ц}}{L}.$$

В случае, если это условие не выполняется, судно должно рассматриваться как неудовлетворяющее требованиям Правил в отношении устойчивости на курсе.

1.5 Первая критическая точка диаграммы управляемости

В случае $\omega_c > 0$ для вывода судна из циркуляции на один борт и ввода его в циркуляцию на другой борт руль должен быть переложён на другой борт на угол, больший угла обратной поворотливости δ_{R1} .

Угол обратной поворотливости соответствует слившимся корням уравнения

$$A\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 - B\frac{\omega}{\omega_c} - C = 0,$$

т.е. случаю $B^2 + 4AC = 0$,

или, в развернутом виде $(B_1 + B_2\delta_{R1})^2 + 4(C_1 - C_{II}\delta_{R1})\delta_{R1} = 0$.

После подстановки и преобразований получим расчетное уравнение

$$a_1\delta_{R1}^2 + b_1\delta_{R1} + B_1^2 = 0,$$

где

$$a_1 = B_2^2 - 4AC_{II};$$

$$b_1 = 2B_1B_2 + 4AC_I,$$

откуда угол обратной поворотливости находится как

$$\delta_{R1} = \frac{-b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4a_1B_1^2}}{2a_1}.$$

Во избежание потери точности, рекомендуется для вычисления меньшего по абсолютной величине корня (он и имеет физический смысл), воспользоваться формулой

4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4.

УГОЛ КРЕНА НА ЦИРКУЛЯЦИИ

Цель работы -

Освоение методики оценки угла крена на циркуляции и выполнение практической оценки угла крена на циркуляции и допустимой скорости хода при выходе на циркуляцию.

Угол крена на установившейся циркуляции обычно оценивается по формуле Г. А. Фирсова:

$$\theta_{уст}^\circ = 1,4 \frac{v_0^2}{h_0 L} \left(z_G - \frac{d}{2} \right).$$

В этой формуле h_0 - начальная метацентрическая высота, м.

Метацентрическая высота связана с z_G известной формулой

$$h_0 = r_0 + z_{c0} - z_G,$$

где r_0 - начальный метацентрический радиус, м;

z_{c0} - аппликата центра величины, м.

При отсутствии точных данных следует иметь ввиду, что обычно

$$h_0 = (0,05 \dots 0,10)B,$$

а значения r_0 , z_{c0} приближенно можно оценить по формулам

$$\text{- Фан-дер-Флита} \quad r_0 = \frac{(C_W B)^2}{11,4 C_B d}$$

$$\text{- В. Л. Позднюнина} \quad z_{c0} = \frac{C_W}{C_W + C_B} d.$$

В рассматриваемом случае

$$r_0 = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$z_{c0} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$z_G = \underline{\hspace{2cm}}$$

Следовательно

$$h_0 = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\theta_{уст}^\circ = \underline{\hspace{2cm}}$$

Допустимый угол крена для обычных судов (кроме пассажирских) не регламентируется, но нежелательно, чтобы он превышал «угла трения» (для стали по стали $\sim 8^\circ$), так как при превышении его происходит смещение незакрепленных грузов.

Для пассажирских судов угол крена на циркуляции не должен пре-

$D_{\text{ц}}/L \leq 4$, а также эксплуатационным требованиям для судов соответствующего типа и размеров.

3 Устойчивость на курсе

Относительный диаметр самопроизвольной циркуляции при переположенном руле $D_{\text{с}}/L$ должен удовлетворять требованию Правил Регистра

$$D_{\text{с}}/L \geq 6,7 \frac{D_{\text{ц}}}{L}.$$

4 По ИМО [6] ширина петли диаграммы управляемости должна удовлетворять следующим требованиям (они относятся к судам с $L > 100$ м и всем нефтяным танкерам, химовозам и газовозам):

$$2\delta_{\text{R1}}^{\circ} < \frac{1}{3} \frac{L}{v_0} \quad \text{для судов с} \quad 9 \leq \frac{L}{v_0} \leq 45 \text{ с};$$

$$2\delta_{\text{R1}}^{\circ} = 0 \quad \text{для судов с} \quad \frac{L}{v_0} < 9 \text{ с};$$

$$2\delta_{\text{R1}}^{\circ} = 12 \quad \text{для судов с} \quad \frac{L}{v_0} > 45 \text{ с}.$$

Контрольные вопросы к работе 3

1. Какие требования к диаметру установившейся циркуляции предъявляет Стандарты маневренности судов ИМО и Правила Регистра ?
2. Для каких типов судов эксплуатационные требования к поворотливости оказываются более жесткими, чем требования Стандартов маневренности судов ИМО и Правил Регистра ?
3. Как оценивается устойчивость на курсе по Правилам Регистра ?
4. Как оценивается устойчивость на курсе по Стандартам маневренности судов ИМО ?
5. Какие требования к маневренности судна предъявляются Стандартами маневренности судов ИМО ?

$$\delta_{\text{R1}} = - \frac{2B_1^2}{b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1B_1^2}}.$$

Затем определяется и соответствующая δ_{R1} угловая скорость

$$\omega_1 = \frac{B_1 + B_2 \delta_{\text{R1}}}{2A}$$

Значения δ_{R1} и ω_1 являются координатами первой критической точки диаграммы управляемости.

Расчет диаграммы управляемости ведется в таблицах 1, 2.

В последних строках таблицы 2 выполняется оценка относительной скорости хода на установившейся циркуляции по приближенной формуле Г. А. Фирсова

$$\bar{v} = \text{th} \left(\frac{0,408}{\omega} \right),$$

а также размерной угловой скорости судна ω , с^{-1} .

В случае, если $\bar{v}$ существенно отличаются от значений, принятых в таблице 1 по результатам расчетов программы TURN, делается второе приближение.

Затем строится диаграмма управляемости.

Таблица 1 - Диаграмма управляемости, вспомогательные параметры

Элементы Расчета	δ_R					
		0	0,05	0,10	0,20	0,30
δ_R° , гр		0	2,86	573,	11,46	17,19
$v(\delta_R)$						
$\bar{v} = v/v_0$	1	1				
$T_E(v)$						
K_{DE}						
$t(K_{DE})$						
$W_T(K_{DE})$						
C_{TA}						
A_{RE}						
κ_{DP}						
κ_E						
$\bar{A}_{RE}$						
$\bar{E}$						
a						
b						
c						
e						
f						
e/f						
$\frac{\bar{l}_R \bar{E}}{f}$						
B_1						
B_2						
C_I						
C_{II}						

Продолжение таблицы 3

Элементы расчета	β				
	0.200	0,250			
β° , гр					
A_k					
$B_k \beta$					
$A_k + B_k \beta$					
$\bar{\omega} = (A_k + B_k \beta) \beta$					
$\bar{v} = f(\bar{\omega})$, рис.					
$\bar{\omega} = \bar{\omega} \bar{v}$					
$\omega = \bar{\omega} \frac{v_0}{L}$, с ⁻¹					

Содержание отчета по работе

В отчете должны быть приведены

1. Все обоснования и расчеты по п.1, 2;
2. Диаграмма управляемости и корпусная диаграмма
3. Заключение по работе.

В Заключении по расчету управляемости на тихой воде должны быть освещены следующие вопросы

- 1 Приемлемость допущения о малости углов дрейфа.

Наибольший угол дрейфа $|\beta|_{\max}$ имеет место при полной перекладке руля ($\delta_R^\circ = 35^\circ$). По условию $|\beta|_{\max} < 0,3$ делается вывод о приемлемости допущения о малости углов дрейфа применительно к рассматриваемому судну.

- 2 Поворотливость при полной перекладке руля

Относительный диаметр установившейся циркуляции при полной перекладке руля $D_{ц}/L$ должен удовлетворять требованию Правил -

$$\bar{\omega} = \bar{A}_L \beta \frac{\left(\bar{I}_R C_{Y\beta}^\beta + C_{M\beta}^\beta \right) + \bar{I}_R C_2 \beta}{2 \bar{I}_R + \bar{A}_L C_{M\omega}^\omega}$$

либо в виде т. н. «балансировочной диаграммы» - зависимости $\beta = f(\delta_R)$.

Вычисление корпусной диаграммы сведено в таблицу 3.

Предварительно определяются вспомогательные величины:

$$A_k = \bar{A}_L \frac{\left(\bar{I}_R C_{Y\beta}^\beta + C_{M\beta}^\beta \right)}{2 \bar{I}_R + \bar{A}_L C_{M\omega}^\omega}; \quad B_k = \bar{A}_L \frac{\bar{I}_R C_2}{2 \bar{I}_R + \bar{A}_L C_{M\omega}^\omega}$$

Расчет продолжается до значений $\bar{\omega}$, соответствующих углу пере-
кладки руля на борт.

По результатам расчета в таблице 3 строится корпусная диаграмма.

Таблица 3 - Корпусная диаграмма

Элементы расчета	β				
	0	0,025	0,050	0,100	0,150
β° , гр					
A_k					
$B_k \beta$					
$A_k + B_k \beta$					
$\bar{\omega} = (A_k + B_k \beta) \beta$					
$\bar{v} = f(\bar{\omega})$, рис.					
$\bar{\omega} = \bar{\omega} \bar{v}$					
$\omega = \bar{\omega} \frac{v_0}{L}$, с ⁻¹					

Продолжение таблицы 1

Элементы Расчета	δ_R		
	0,40	0,50	0,60
δ_R° , гр	22,92	28,65	34,4
$v(\delta_R)$			
$\bar{v} = v/v_0$			
$T_E(v)$			
K_{DE}			
$t(K_{DE})$			
$W_T(K_{DE})$			
C_{TA}			
A_{RE}			
κ_{DP}			
κ_E			
$\bar{A}_{RE}$			
$\bar{E}$			
a			
b			
c			
e			
f			
e/f			
$\frac{\bar{I}_R \bar{E}}{f}$			
B_1			
B_2			
C_I			
C_{II}			

Таблица 2 - Угловая скорость и относительный диаметр циркуляции

Элементы Расчета	δ_R				
		0	0,05	0,10	0,20
δ_R° , гр		0	2,86	5,73	11,46
B_1					
$B_2\delta_R$					
$B = B_1 + B_2\delta_R$					
C_I					
$C_{II}\delta_R$					
$C_I - C_{II}\delta_R$					
$C = (C_I - C_{II}\delta_R)\delta_R$					
$\omega = \frac{B \pm \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A}$					
$D_u/L = \frac{2}{\omega}$					
$x = 0,408/\omega$					
$e^x \equiv \exp(x)$					
$\bar{v} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$					
$\bar{\omega} = \omega \bar{v}$					
$\omega = \bar{\omega} \frac{v_0}{L}, \text{ c}^{-1}$					

Продолжение таблицы 2

Элементы Расчета	δ_R			
	0,30	0,40	0,50	0,60
δ_R° , гр	17,19	22,92	28,65	34,4
B_1				
$B_2\delta_R$				
$B = B_1 + B_2\delta_R$				
C_I				
$C_{II}\delta_R$				
$C_I - C_{II}\delta_R$				
$C = (C_I - C_{II}\delta_R)\delta_R$				
$\omega = \frac{B \pm \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A}$				
$D_u/L = \frac{2}{\omega}$				
$x = 0,408/\omega$				
$e^x \equiv \exp(x)$				
$\bar{v} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$				
$\bar{\omega} = \omega \bar{v}$				
$\omega = \bar{\omega} \frac{v_0}{L}, \text{ c}^{-1}$				

2 Угол дрейфа на циркуляции

Угол дрейфа на циркуляции представляется либо в виде корпусной диаграммы - зависимости угла дрейфа β от безразмерной угловой скорости $\bar{\omega}$: