

**Министерство образования и науки
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»
Факультет Кораблестроения и океанотехники**

Мд Салим бин Камил

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛНОВОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ОДНОКОРПУСНЫХ,
ДВУХКОРПУСНЫХ И ТРЕХКОРПУСНЫХ СУДОВ МЕТОДОМ
КОНЕЧНОГО КОРНЯ**

**диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Специальность 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы

научный руководитель: д.т.н., з.д. науки РФ, проф. К.В. Рождественский

Санкт-Петербург

2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Страница

ОГЛАВЛЕНИЕ	2 - 4
ВВЕДЕНИЕ	5 - 49
В.1. Некоторые базовые сведения по вопросу о сопротивлении судна	5 - 7
В.2. Обзор эволюции представлений о сопротивлении судна и волновом сопротивлении судна	7 - 9
В.2.1. Формула Мичеля для определения волнового сопротивления (Интеграл Мичеля)	9 - 13
В.2.2. Формула Ньюмена определения волнового сопротивления	13 - 14
В.2.3. Интеграл волнового сопротивления Така-Лазаускаса для двухкорпусного судна (катамарана)	15
В.2.4. Получение волнового интеграла Така-Лазаускаса для трехкорпусного судна (тримарана)	15 - 17
В.2.5. Исследование результатов других авторов по волновому сопротивлению	17 - 43
В.3. Формулировка направления исследования	43
В.3.1. Цель диссертационной работы	43
В.3.2. Постановка задачи	43 - 44
В.3.3. Цель исследования	44
В.3.4. Предмет исследований	44
В.3.5. Методология исследований	44 - 45
В.3.6. Достоверность результатов	45 - 46
В.3.7. Представление работы к защите	46 - 48
В.3.8. Выполненные эксперименты	48
В.3.9. Список публикаций и статей в Трудах конференций по теме диссертации	48 - 49
ГЛАВА 1 - ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОДНОКОРПУСНЫХ СУДОВ	50 - 76
1.1. Предыстория	50

1.2. Основное уравнение – выражение Мичеля-Виглея для определения волнового сопротивления	50 - 55
1.3. Основное уравнение – Формула Ньюмена для вычисления волнового сопротивления	55 - 57
1.4. Ревизия основных уравнений	57 - 58
1.5. Техника вычислений	59 - 60
1.6. Экспериментальный анализ.....	60 - 61
1.7. Теоретический анализ	61 - 62
1.8. Результаты экспериментального и теоретического анализа и их апробация	62 - 76

ГЛАВА 2 - ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВУХКОРПУСНЫХ СУДОВ (КАТАМАРАНОВ)

77 - 117

2.1. Предыстория	77
2.2. Основное уравнение Така-Лазаускаса для определения волнового сопротивления двухкорпусных судов.....	77 - 79
2.3. Усовершенствование основного уравнения.....	79 - 80
2.4. Техника вычислений.....	80
2.5. Экспериментальный анализ.....	80
2.6. Теоретический анализ	80 - 81
2.7. Результаты экспериментального и теоретического анализа и их апробация	81 - 117

ГЛАВА 3 - ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРЕХКОРПУСНЫХ СУДОВ (ТРИМАРАНОВ)

118 - 133

3.1. Предыстория	118 - 119
3.2. Основное уравнение – Формула Така-Лазаускаса вычисления волнового сопротивления тримаранов.....	119 - 120
3.3. Усовершенствование основного уравнения.....	120 - 121
3.4. Методика вычислений	121
3.5. Экспериментальный анализ.....	121
3.6. Теоретический анализ.....	121 - 123

3.7. Результаты экспериментального и теоретического анализа и апробация.....	123 - 133
ГЛАВА 4 – ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.....	134 - 147
4.1. Основное уравнение	134 - 135
4.2. Параметрические исследования	135
4.3. Параметрическое исследование для однокорпусных судов	135 - 137
4.4. Параметрические исследования для катамаранов	137 - 143
4.5. Параметрические исследования для тримаранов	144 - 147
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	148 – 152
ЛИТЕРАТУРА	153 - 156
ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	157 - 159
БЛАГОДАРНОСТИ.....	160
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 - Список таблиц и рисунков	161 - 175
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 - Некоторые экспериментальные и теоретические результаты других авторов	175 - 188
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 - Диаграмма методологии исследований, блок-схема расчета, алгоритм расчета и характерные результаты расчета для однокорпусных судов	189 - 215
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 - Схема расчета, диаграмма расчета и характерные результаты для двухкорпусных судов	216 - 245
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 - Схема расчета, расчетные процедуры и характерные результаты для трехкорпусных судов	246 - 277

ВВЕДЕНИЕ

В.1. Некоторые базовые сведения по вопросу о сопротивлении судна. Сопротивление судна можно определить как силу необходимую для его буксировки при заданной скорости при определенных условиях, таких например как в условиях голого корпуса, при наличии выступающих частей, на тихой воде, на волнении, при наличии ветра и т.д. В отношении компонентов полного сопротивления, и два возможных представления представлены на Рис. В.1 – В.2. Рассматривая Рис. В.1 видим, что основными компонентами сопротивления судна являются сопротивление его обшивки или сопротивление трения (R_F) и сопротивление давления (R_P). Сопротивление трения обусловлено касательными напряжениями и вычисляется путем интегрирования этих напряжений по смоченной поверхности судна. Сопротивление трения можно определить используя корреляционную кривую Международной конференции опытовых бассейнов 1957 года (Корреляционная кривая МКОБ 1957) или любые другие существующие варианты таких кривых. Сопротивление давления связано с нормальными напряжениями на смоченной поверхности судна в направлении движения и включает волновое сопротивление, сопротивление от разрушения волн и вязкостное сопротивление давления. Основные компоненты полного сопротивления могут быть записаны следующим образом :

$$R_T = R_F + R_R; \quad R_T = \frac{1}{2}C_T\rho SV^2; \quad R_R = \frac{1}{2}C_R\rho SV^2; \quad R_F = \frac{1}{2}C_F\rho SV^2$$

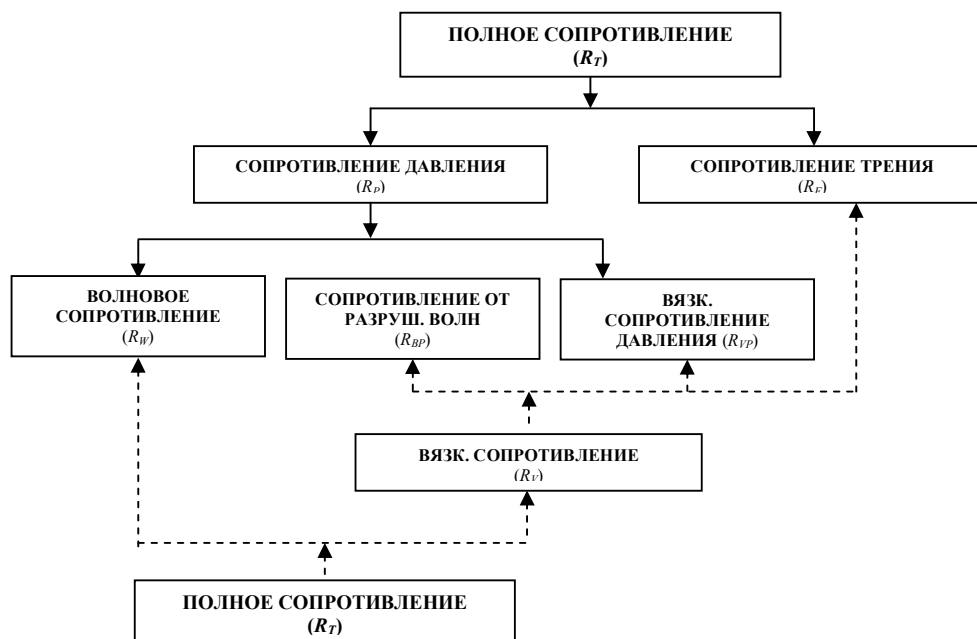


Рис. В.1. – Составляющие сопротивления судна

Если идти из нижней части Рис. В.1 по пунктирным стрелкам, полное сопротивление представляется составленным из двух главных компонент, а именно вязкостного сопротивления (R_V) и волнового сопротивления (R_W). При этом в вязкостное сопротивление (R_V) включено сопротивление от разрушения волн (R_{BP}), вязкостное сопротивление давления (R_{VP}) и сопротивление трения (R_F). Другой вид сопротивления, который может быть включен в полное

сопротивление это воздушное сопротивление или сопротивление, связанное с ветром. Волновое сопротивление оказывается наибольшей составляющей остаточного сопротивления.

Другой подход представления компонентов сопротивления судна состоит в использовании метод форм-фактора [1], как проиллюстрировано на Рис. В.2. Все компоненты сопротивления, а также коэффициенты для судна и его модели связаны соответствующим образом. При этом нижние индексы m и s относятся к модели и натурному судну соответственно.

Один из методов изучения связи сопротивления судна и функциональных переменных состоит в применении подобия и размерности [1]. Этот метод предполагает, что при получении общих эмпирических выражений и физических соотношений каждое уравнение, с точки зрения размерности, должно быть однородно. Три фундаментальных единицы: масса, длина и время обозначаются символами M , L и T соответственно, где M может быть выражено в

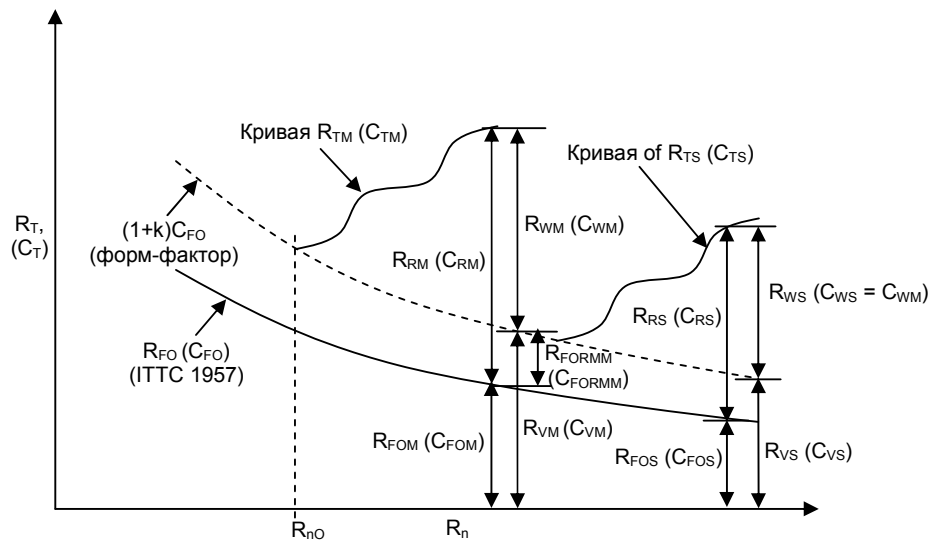


Рис. В.2. – Составляющие сопротивления судна по методу форм-фактора

$$R_T = R_W + R_V; \quad C_T = C_W + C_V$$

$$R_V = (1+k)R_{FO}; \quad C_V = (1+k)C_{FO}$$

$$R_W = R_T - (1+k)R_{FO}; \quad C_W = C_T - (1+k)C_{FO}; \quad C_{WM} = C_{WS}$$

килограммах, L в метрах, а T в секундах. Волновое сопротивление, как известно, зависит от плотности жидкости (ρ ; M/L^3), скорости (V ; L/T), и размерах (L ; L), вязкости (μ ; M/LT), гравитационного ускорения (g ; L/T^2) и давления на единицу площади (p ; M/LT^2). Поэтому, сопротивление судна R может выражаться в виде степенной зависимости от упомянутых переменных с неизвестными показателями степеней, например, a , b , c , d , e и f соответственно.

$$R \propto \rho^a V^b L^c \mu^d g^e p^f$$

Выражая вышеупомянутые величины через символы фундаментальных единиц, имеем;

$$ML/T^2 = (M/L^3)^a (L/T)^b (L)^c (M/LT)^d (L/T^2)^e (M/LT^2)^f$$

Применения анализа теории подобия и размерностей дает;

$$R \propto \rho V^2 L^2 f [(\rho VL/\mu)^{-d} (gL/V^2)^e (p/\rho V^2)^f]$$

Учитывая, что кинематическая вязкость равна $\nu = \mu/\rho$, а площадь S пропорциональна L^2 , это выражение может быть переписано как;

$$R/1/2\rho SV^2 = f [(VL/\nu)(gL/V^2)(p/\rho V^2)]$$

В итоге, приходим к следующим выражениям;

Коэффициент остаточного сопротивления :

$$C_R = R_R/1/2\rho SV^2 = f_1(V^2/gL)$$

Коэффициент сопротивления трения:

$$C_F = R_F/1/2\rho SV^2 = f_2(VL/\nu)$$

Коэффициент полного сопротивления:

$$C_T = R_T/1/2\rho SV^2 = f_1(V^2/gL) + f_2(VL/\nu)$$

Одно из важнейших понятий теории сопротивления судна относится к сопротивлению трения. Классические методы его определения базируются на экспериментах с плоскими пластинами в опытовых бассейнах. Импульс развитию этого понятия дали работы Уилиама Фруда 1872 и 1874, где было введено следующее математическое выражение для сопротивления:

$$R = fSV^n$$

f и n зависят от длины и характера поверхности.

Хронология развития представлений об определении сопротивления трения приведена ниже в Таблице В.1:

В.2. Обзор эволюции представлений о сопротивлении судна и волновом сопротивлении судна. Ранние исследования сопротивления судна в основном проводились экспериментальным путем в опытовых бассейнах. Далее сопротивление модели и соответственно натурного судна определялись методами теории подобия и размерности. При дальнейшем развитии исследований возникли новые подходы, включающие в том числе методы вычислительной гидродинамики.

Большое число работ по определению сопротивления судна и в прошлом и сегодня выполнено с применением теоретических и экспериментальных методов. Постоянные усилия исследователей в течение многих лет были направлены

Таблица В.1. – Различные выражения для определения коэффициента сопротивления C_F

Исследователь	Год	Выражение для C_F	Комментарии
Бласиус	1908	$1.327(VL/\nu)^{-1/2}$	Ламинарный поток
Бакер	1915	$Rf^{1/2}\rho SV^2$	
Прандтля и Вон Карман	1921	$0.072(VL/\nu)^{-1/5}$	Турбулентный поток
Шоенхерр, АТТС	1932	$0.242/\sqrt{C_F = \log_{10}(R_n C_F)}$	
Хугхес	1952, 1954	$0.066/(\log_{10}R_n - 2.03)^2$	Минимально турбулентный поток, C_{FO}
ИТТС	1957	$0.075/(\log_{10}R_n - 2)^2$	МКОБ 1957
Грандвилле	1977	$0.0776/(\log_{10}R_n - 1.88) + 60/R_n$	C_{FO}

на определение составляющих сопротивления, в том числе волнового сопротивления. При этом методы определения сопротивления и его составляющих постоянно совершенствуются в связи с необходимостью правильной оценки мощности энергетической установки для новых судов и судов, прошедших реновацию в том числе с применением оптимизации формы корпуса. Применение современной вычислительной техники позволяет значительно сокращать время необходимое для соответствующего теоретического и экспериментального анализа.

В работах [1] и [2] приведен отличный и полезный хронологический очерк истории развития исследований в области сопротивления судна. Некоторые ссылки на соответствующие работы приведены в нижеследующих параграфах. По-видимому, самая первая работа, посвященная описанию особенностей движения тел в воде, была выполнена Леонардо Да Винчи (1458-1519). В 1687 Исаак Ньютон стал пионером разработки теории сопротивления судна, движущегося в водной среде. Основой этого исследования стал квадратичный закон, связывающий сопротивление и скорость, а также соотношение между касательным напряжением на поверхности тела, динамической вязкостью и градиентом скорости по нормали к поверхности.

В 1749 Эйлера разработал теорию обтекания судна и получил формулы для определения сопротивления, в которых фигурировали площадь мидель-шпангоута, длина корпуса судна, плотность жидкости и скорость движения судна. В 1756 году Бердь провел первые эксперименты с моделями судов в опытовом бассейне. В 1775 Д' Ламберт, Боссу, и Кондерсет провели первые систематические сравнительные испытания моделей судов в опытовом бассейне гравитационного типа с целью определения сопротивления. В 1871 году Виллиам Фруде построил первый опытовый бассейн, оснащенный буксировочной тележкой, а двумя годами позднее предложил метод пересчета сопротивления с модели на натуру с использованием закона гравитационного подобия. Его подход стал фундаментом анализа сопротивления судна.

В 1880 году Менделеев изучал сопротивление движению в водной и воздушной среде в построенном в Санкт-Петербурге опытовом бассейне, первыми научными руководителями которого были Крылов и Бубнов. Именно в этом бассейне происходило становление исследований в области судостроения вплоть до момента образования Центрального научно-исследовательского института имени А.Н. Крылова.

В 1883 Рейнольдс вывел безразмерный критерий подобия потоков вязкой жидкости, получивший название число Рейнольдса. Лорд Кельвин в период 1887-1904 выполнил наблюдения характерных структур волновой системы, показанной на Рис. В.3, включающей поперечные и расходящиеся волны, ограниченные лучами под углом 19 градусов и 28 минут от диаметральной плоскости. Поперечные волны, хорошо видные вблизи носа судна, уменьшаются по высоте вниз по течению и пересекаются с расходящимися волнами.

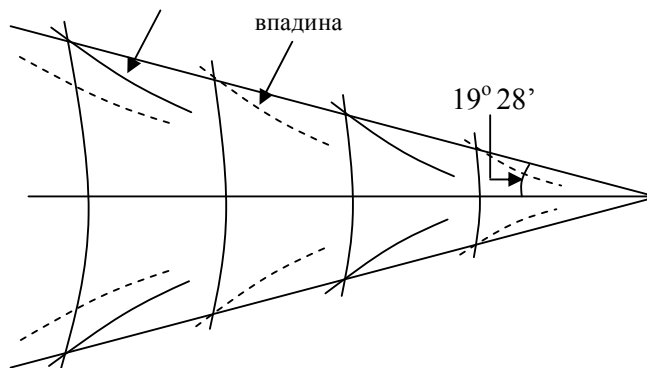
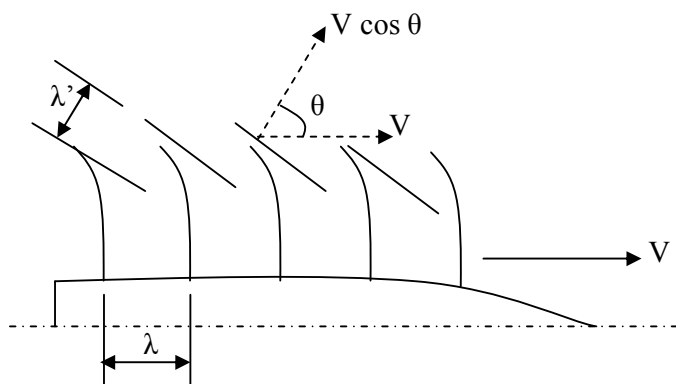


Рис. В.3. – Структура волн Кельвина

Как показано на Рис. В.4 поперечные волны более заметны на середине длины и движутся со скоростью судна, V . Расходящаяся волна движется со скоростью $V \cos \theta$, где θ есть угол между линией вершин и направлением движения судна. Длины волн λ поперечных и расходящихся волн аппроксимируются выражениями $2\pi V^2/g$ и $2\pi V^2 \cos^2 \theta / g$ соответственно. Эти наблюдения лорда Кельвина дали возможность описать генерируемую судном систему волн, сегодня известную как волновая система Кельвина.



$$\lambda = 2\pi V^2/g \text{ и } \lambda' = 2\pi V^2 \cos^2 \theta / g$$

Рис. В.4. – Скорости поперечных и расходящихся волн

В.2.1. Формула Мичеля для определения волнового сопротивления (Интеграл Мичеля). В 1898 году Мичель [3] разработал основанный на линейной теории математический подход к расчету волнового сопротивления. Он поставил задачу определения волнового сопротивления тонкого судна по поверхности идеальной жидкости бесконечной глубины. Мичель получил потенциал скорости посредством интегрального преобразования Фурье и нашел следующее

соотношение между волновым сопротивлением и формой корпуса судна в виде интеграла, широко известного как интеграл Мичеля и приведенного ниже в стандартных обозначениях.

Потенциал скорости, полученный Мичелем посредством интегральной теоремы Фурье:

$$\begin{aligned} \phi = & (2U/\pi^2) \iiint f(\xi, \zeta) \{ [\cos(nz - \varepsilon) \cos(n - \zeta) \cos m(\xi - x)] / [\sqrt{(m^2 + n^2)}] \} \\ & \exp[-y\sqrt{(m^2 + n^2)}] d\xi d\zeta dm; \quad 0 \leq n \leq \infty, \quad 0 \leq m \leq \infty, \quad 0 \leq \zeta \leq \infty, \quad -\infty \leq \xi \leq \infty \\ & - (2U^2/\pi g) \iiint f(\xi, \zeta) [m \exp(-m^2 U^2 (z + \zeta))/g] / [\sqrt{(m^2 U^4/g^2 - 1)}] \sin\{m(x - \xi) + \\ & ym\sqrt{(m^2 U^4/g^2 - 1)}\} d\xi d\zeta dm; \quad g/U^2 \leq m \leq \infty, \quad 0 \leq \zeta \leq \infty, \quad -\infty \leq \xi \leq \infty \\ & + (2U^2/\pi g) \iiint f(\xi, \zeta) [m \exp(-m^2 U^2 (z + \zeta))/g] / [\sqrt{(m^2 U^4/g^2 - 1)}] \cos\{m(x - \xi) + \\ & ym\sqrt{(1 - m^2 U^4/g^2)}\} d\xi d\zeta dm; \quad 0 \leq m \leq g/U^2, \quad 0 \leq \zeta \leq \infty, \quad -\infty \leq \xi \leq \infty \end{aligned}$$

Волновое сопротивление по Мичелю определяется путем интегрирования распределения давления по корпусу судна вдоль его длины.

$$R_w = -2\rho U \iint (d\phi/dx)(d\eta/dx) dx dz$$

Дифференцируя потенциал скорости ϕ по x и подставляя результат в приведенную выше формулу, содержащую интегралы I и J, получим формулу Мичеля определения волнового сопротивления или интеграл Мичеля;

$$\begin{aligned} R_w = & (4\rho U^4/\pi g) \iiint f(x, z) f(\xi, \zeta) [m^2 \exp(-m^2 U^2 (z + \zeta))/g] / [\sqrt{(m^2 U^4 \ell g^2 - 1)}] \cdot \\ & \cos m(x - \xi) dx dz d\xi d\zeta dm; \\ & g/U^2 \leq m \leq \infty, \quad 0 \leq \zeta \leq \infty, \quad -\infty \leq \xi \leq \infty, \quad 0 \leq z \leq \infty, \quad -\infty \leq x \leq \infty \\ = & (4\rho U^4/\pi g) \int (I^2 + J^2) m^2 / [\sqrt{(m^2 U^4 \ell g^2 - 1)}] dm; \quad g/U^2 \leq m \leq \infty \\ = & (4\rho U^4/\pi g) \int (I^2 + J^2) \lambda^2 / [\sqrt{(\lambda^2 - 1)}] d\lambda; \quad 1 \leq \lambda \leq \infty \end{aligned}$$

Где; $\lambda = mv^2/g$

$$\begin{aligned} J = & \iint f(x, z) \exp(-\lambda^2 gz/U^2) \sin(\lambda gx/U^2) dx dz; \quad -\infty \leq x \leq +\infty, \quad 0 \leq z \leq \infty \\ I = & \iint f(x, z) \exp(-\lambda^2 gz/U^2) \cos(\lambda gx/U^2) dx dz; \quad -\infty \leq x \leq +\infty, \quad 0 \leq z \leq \infty \end{aligned}$$

Дальнейшие работы, использующие интеграл Мичеля, выполненные Виглеем в 1926, 1931, 1942 и 1948 годах, в частности, позволили разобраться в том как именно рассчитывать интеграл Мичеля, введенный в его работах [4], [5],

[6] и [7]. Виглей ввел значительные усовершенствования в интеграл Мичеля, представил более ясную физическую интерпретацию этого интеграла, обосновал его приложения и методы расчета. Модифицированный Виглеем Интеграл волнового сопротивления Мичеля приведен ниже :

$$R_w = (4\rho g^2/\pi U^2) \int (I^2 + J^2) \sec^3 \theta d\theta; 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

$$J = bd \iint (\delta\eta/\delta\zeta) \exp(-dg\zeta \sec^2 \theta/U^2) \sin(\ell g\zeta \sec \theta/U^2) \delta\zeta d\zeta; -1 \leq \zeta \leq +1, 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

$$I = bd \iint (\delta\eta/\delta\zeta) \exp(-dg\zeta \sec^2 \theta/U^2) \cos(\ell g\zeta \sec \theta/U^2) \delta\zeta d\zeta; -1 \leq \zeta \leq +1, 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

Фигурирующая в интеграле Мичеля переменная λ была заменена на $\sec\theta$ и позволила перевести пределы интегрирования по ξ и ζ соответственно от -1 до +1 и от 0 до +1 соответственно. При проведении расчетов волнового сопротивления на основании вышеприведенного уравнения Виглей использовал форму корпуса, симметричную относительно миделя и относительно диаметральной плоскости (интеграл $I = 0$), в которой все ватерлинии и шпангоутные сечения обладают геометрическим подобием, причем для облегчения интегрирования, применялись следующие представления формы корпуса;

$$\eta = f(\zeta, \zeta) = f_1(\xi) \times f_2(\zeta), f_1(\xi) = (1 - \xi^2) (1 + a_2 \xi^2 + a_4 \xi^4), f_2(\zeta) = (1 - \zeta^2)$$

Призматический коэффициент C_p связан с параметрами a_2 и a_4 следующим образом;

$$C_p = \int f_1(\xi) d\xi; 0 \leq \xi \leq 1$$

$$= 2/3 + 2a_2/15 + 2a_4/35$$

$$J = bd \int f_2 \exp(-dg \sec^2 \theta \zeta/U^2) d\zeta \int (\delta f_1 / \delta \zeta) \sin(\ell g \zeta \sec \theta/U^2) d\zeta; -1 \leq \zeta \leq +1,$$

$$0 \leq \theta \leq \pi/2$$

$$= bd \int (1 - \zeta^2) \exp(-dg \sec^2 \theta \zeta/U^2) d\zeta \int [(2(a_2 - 1)\zeta + 4(a_4 - a_2)\zeta^3 -$$

$$6a_4)\zeta^5] \sin(\ell g \zeta \sec \theta/U^2) d\zeta; -1 \leq \zeta \leq +1, 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

Окончательное выражение для волнового сопротивления судна получено с применением следующих преобразований;

$$\chi = \ell g \zeta \sec \theta/U^2 = \sec \theta / 2Fn^2, \psi = dg \sec^2 \theta/U^2 = d \sec^2 \theta / 2\ell Fn^2$$

$$R_w/b^2 U^2 = (4\rho g^2/\pi U^4 b^2) \int J^2 \sec^3 \theta d\theta = (64\rho/\pi) \int F^2(\psi) (f^2(\chi)/\chi^2) \cos \theta d\theta;$$

$$0 \leq \theta \leq \pi/2$$

Выражение для профиля волны далеко вниз по потоку имеет вид;

$$\zeta = (16bU^2/\pi g\ell) \int F(\psi) f(\chi) \sin(gx \sec \theta / U^2) \cos(gy \sin \theta \sec^2 \theta / U^2) d\theta; 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

Выражение для профиля волн в диаметральной плоскости в случае безграничной жидкости, когда $F(\psi) = 0$ и при $y = 0$ принимает вид

$$\zeta = (16bU^2/\pi g\ell) \int f(\chi) \sin(gx \sec \theta / U^2) d\theta; 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

Где;

a_2 и a_4 – произвольные задаваемые параметры, Fn – число Фруда,

b – половина ширины, d – осадка,

g – ускорение свободного падения

ℓ – половина длины, ρ – плотность воды, U – скорость судна

$$F(\psi) = 1 - (2/\psi^2) + 2e^{-\psi}(1/\psi + 1/\psi^2)$$

$$f(\chi) = [(\cos \chi - \sin \chi / \chi) + a_2(\cos \chi - 5 \sin \chi / \chi - 12 \cos \chi / \chi^2 + 12 \sin \chi / \chi^3) + a_4(\cos \chi - 9 \sin \chi / \chi - 48 \cos \chi / \chi^2 + 168 \sin \chi / \chi^3 + 360 \cos \chi / \chi^4 - 360 \sin \chi / \chi^5)]$$

$$\chi < 1.5, f(\chi) = -\chi^2 (1/3 + a_2/15 + a_4/35); \chi > 50,$$

$$f(\chi) = \cos \chi (1 + a_2 + a_4) = \frac{1}{2} t \cos \chi; t = 2(1 + a_2 + a_4)$$

Приведенное выше выражение для волнового сопротивления судна было упрощено с применением асимптотического выражения в предположении малости чисел Фруда посредством отбрасывания более высоких степеней числа Фруда F_n в некотором диапазоне изменения этих чисел и осадки d . Виглей рассчитал волновое сопротивление серии моделей судна при изменении форм-параметров и различных условиях обтекания, а также провел сравнение расчетных данных с экспериментом. Часть результатов показаны на Рис. В.9 (а), В.9 (б) и в Приложении.

В 1931 Виглей выполнил исследования волнового сопротивления для судового корпуса с клиновидными оконечностями и вставки постоянной ширины. Как выяснилось, наблюдаемая им волновая система включала симметричную интерференционную часть, носовую волновую систему, переднюю и заднюю правую бортовые системы, а также кормовую волновую систему как показано на Рис. В.11 Приложения. В случае модели с клиновидными оконечностями Виглей проанализировал волновое сопротивление C_w и его составляющие как показано на Рис. В.12 Приложения. Виглей записал волновое сопротивление и его коэффициент следующим образом;

$$Rw \propto V^6 \text{ (постоянное слагаемое и 4 осциллирующих слагаемых)}$$

$$Cw = Rw / \frac{1}{2} \rho S V^2 = V^4 \text{ (постоянное слагаемое и 4 осциллирующих)}$$

В 1934 году Виглей исследовал волновую систему модели с параболической ватерлинией, включающую пять составляющих: симметричное возмущение, волновую систему, связанную с углом при вершине носового клина, волновую систему, связанную с кривизной передней части корпуса, волновую систему, связанную с задней частью корпуса и волновую систему, связанную с углом при

вершине кормового клина как показано на Рис. В.13 Приложения. Позднее в 1942 году, Виглей осуществил расчет составляющих волнового сопротивления, соответствующих поперечным и расходящимся волнам как показано на Рис. В.14 Приложения, результаты которого показывают положение максимумов и минимумов при малых числах Фруда (F_n). При более высоких значениях числа Фруда F_n волновое сопротивление от расходящихся волн доминирует и последний минимум, как легко видеть, имеет место в окрестности $F_n = 0.5$.

В.2.2. Формула Ньюмена определения волнового сопротивления. В 1977 Ньюмен в своем исследовании [9] показал, что при постоянной плотности воды величина волнового сопротивления пропорциональна квадрату скорости судна (U^2) и взвешенному интегралу квадрата волновой амплитуды ($|A(\theta)|^2$), а также пропорциональна кубу косинуса угла ($\cos^3\theta$) распространения волн с преобладанием влияния поперечных волн. При получении формулы для вычисления волнового сопротивления, он связал волновое сопротивление судна с потоком волновой энергии вниз по потоку. Он показал связь интеграла, включающего волновую амплитуду $A(\theta)$ с волновым интегралом, фигурирующим в линейной теории тонкого судна Мичеля. Поток энергии в следе движущегося судна может быть выражен через интеграл волнового сопротивления [9]. Рассматривая контрольный объем, ограниченный вертикальной контрольной поверхностью $x = \text{constant}$ и движущийся вместе с судном, можно показать, что поток энергии через контрольную поверхность может быть ассоциирован с работой необходимой для преодоления волнового сопротивления. Энергия каждого сечения единичной ширины движется в направлении θ с групповой скоростью V_g . Таким образом, скорость переноса энергии через контрольную поверхность, движущейся через жидкость со скоростью U , равна $(V_g \cos\theta - U)$. Полный поток энергии в направлении x можно найти умножая плотность энергии на $\frac{1}{2}\rho g A^2$ и интегрируя по ширине контрольной поверхности и выразить следующим образом;

$$dE/dt = \frac{1}{2}\rho g \int A^2 (V_g \cos\theta - U) dz, -\infty \leq z \leq \infty$$

Волновая амплитуда A может быть аппроксимирована методом стационарной фазы в виде;

$$A = |A(\theta)| (2\pi / RG(\theta))^{0.5}$$

$$V_g = \frac{1}{2}V_p = \frac{1}{2}U \cos\theta$$

Подставляя приведенное выше выражение в интеграл потока энергии, можно получить;

$$D = \pi \rho g \int \{ |A(\theta)|^2 / RG''(\theta) \} (1 - \frac{1}{2}\cos^2\theta) dz; -\infty \leq z \leq \infty$$

dz можно получить с помощью выражения $x \sec^2\theta \sin\theta + z \sec^3\theta (1 + \sin^2\theta) = 0$, полученного из условия $d/d\theta \{ (x \cos\theta + z \sin\theta) / \cos^2\theta \} = 0$. Выполняя дифференцирование, получим;

$$x (d/d\theta) (\sec^2\theta \sin\theta) + z (d/d\theta) \{ \sec^3\theta (1 + \sin^2\theta) \} = -(dz/d\theta) \{ \sec^3\theta (1 + \sin^2\theta) \}$$

Дважды дифференцируя фазовую функцию $RG(\theta) = (g/U^2)(x \sec \theta + z \sec^2 \theta \sin \theta)$, получим;

$$RG''(\theta) = (g/U^2)[x (d/d\theta)(\sec^2 \theta \sin \theta) + z (d/d\theta)\{\sec^3 \theta(1 + \sin^2 \theta)\}]$$

Следовательно;

$$|dz/d\theta| = |RG''|/[(g/U^2)\sec^3 \theta(1 + \sin^2 \theta)] = (U^2/g)\cos^3 \theta |RG''|/(2 - \cos^2 \theta)$$

Поставляя dz в интеграл потока энергии, получим формулу Ньюмена для определения волнового сопротивления в следующем виде;

$$D = R_w = (\pi \rho U^2/2) \int |A(\theta)|^2 \cos^3 \theta d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$$

Альтернативно, для случая симметричного интеграла, приведенное выше выражение можно представить в виде;

$$R_w = (\pi \rho U^2) \int |A(\theta)|^2 \cos^3 \theta d\theta; 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

$A(\theta)$ - функция волновой амплитуды, $\cos^3 \theta$ в основном ассоциируется с поперечными волнами, а θ представляет собой угол распространения волн. Для тонкого судна амплитудная волновая функция Ньюмена $A(\theta)$ выражается в виде;

$$A(\theta) = (2\nu/\pi)\sec^3 \theta \iint_{\eta_x} \exp[\nu \sec^2 \theta(z + ix \cos \theta)] dz dx; d \leq z \leq 0, -L/2 \leq x \leq L/2$$

Вычисляя действительную часть, получим;

$$A(\theta) = (2\nu/\pi)\sec^3 \theta \iint_{\eta_x} \exp(\nu \sec^2 \theta z) \cos(\nu \sec \theta x) dz dx; d \leq z \leq 0, -L/2 \leq x \leq L/2$$

$$\nu = g/U^2$$

Подставляя приведенное выше выражение для $A(\theta)$ в формулу для волнового сопротивления, можно получить интеграл, напоминающий интеграл Мичеля ;

$$R_w = (4\rho g^2/\pi U^2) \int \sec^3 \theta \left| \iint_{\eta_x} \exp(\nu \sec^2 \theta z) \cos(\nu \sec \theta x) dz dx \right|^2 d\theta; 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

Приведенное выше выражение можно переписать в форме интеграла Мичеля следующим образом;

$$R_w = (4\rho g^2/\pi U^2) \int |I_{CP}|^2 \sec^3 \theta d\theta; 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

$$I_{CP} = \iint_{\eta_x} \exp(\nu \sec^2 \theta z) \cos(\nu \sec \theta x) dz dx; d \leq z \leq 0, -L/2 \leq x \leq L/2$$

Где;

I_{CP} представляет собой интеграл I , вычисляемый в диаметральной плоскости

В.2.3. Интеграл волнового сопротивления Така-Лазаускаса для двухкорпусного судна (катамарана). Двухкорпусные суда или катамараны широко используются как скоростные суда, например, скоростные паромы. Преимуществами катамаранов перед однокорпусными судами равного водоизмещения является большая эксплуатационная скорость, значительно большая площадь палубы, большая поперечная устойчивость, меньшая осадка, меньшая расположенность к бортовой качке, меньшее волновое сопротивление в некотором диапазоне чисел Фруда в связи с удлинённостью корпусов и неизменно меньшее полное сопротивление. Тем не менее, известны и недостатки катамаранов по сравнению с однокорпусными судами, к которым относятся: предрасположенность к килевой и вертикальной качке, большая сложность конструкции, сложность волнового взаимодействия корпусов и большее вязкостное сопротивление в диапазоне более высоких скоростей.

Волновая система далеко вниз по потоку, волновая амплитуда и волновое сопротивление для катамарана с идентичными корпусами, полученные Таком и Лазаускасом (1998), и также приведенные в [30] Фалтинсеном (2005) могут быть записаны следующим образом:

Волновая система в общей системе координат (x, y, z) и в локальной связанной системе координат (x_{j0}, y_{j0}, z_{j0}) ;

$$\zeta_j(x, y) = \operatorname{Re} \int A_j(\theta) \exp[-ig/U^2 \cos^2 \theta (x_{j0} \cos \theta + y_{j0} \sin \theta)] \cdot \exp[-ig/U^2 \cos^2 \theta (x \cos \theta + y \sin \theta)] d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$$

Волновая амплитудная функция, учитывающая взаимодействие N корпусов;

$$A(\theta) = \sum A_j(\theta) \exp[-ig/U^2 \cos^2 \theta (x \cos \theta + y \sin \theta)] d\theta; j = 1 \text{ до } N$$

Волновое сопротивление катамарана ($j = 2$), включающего идентичные корпуса;

$$R_w = (1/2 \pi \rho U^2) \int |A(\theta)|^2 HIF_T(\theta) \cos^3 \theta d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$$

$$HIF_T(\theta) = 4 \cos^2 [0.5(2p/L) \sin \theta / (Fn^2 \cos^2 \theta)]$$

$HIF_T(\theta)$ – фактор продольного взаимодействия корпусов

В.2.4. Получение волнового интеграла Така-Лазаускаса для трехкорпусного судна (тримарана). Тримаран или трехкорпусное судно включает три корпуса удлинённых корпуса: центральный и два идентичных боковых. Взаимное расположение центрального и боковых корпусов может быть различным. Тримаран может воспроизводить характеристики лучших традиционных однокорпусных судов и катамаранов. Система корпусов тримарана может быть спроектирована оптимальным образом для снижения волнового сопротивления до минимума. При этом за счет боковых корпусов можно получить весьма значительный выигрыш в устойчивости. Очевидно, тримаран имеет преимущества в отношении площади палуб и располагаемых объемов пространства для размещения пассажиров и команды, груза и машинной установки по сравнению с однокорпусными судами и катамаранами.

На основе данных многочисленных исследований, можно принять, что при малых скоростях доминирует сопротивление трения и тримаран теряет свои преимущества в связи с большой площадью смоченной поверхности и, следовательно, большим остаточным сопротивлением, главным вклад в которое вносит волновое сопротивление. Волновое сопротивление тримарана, связанное с взаимодействием корпусов, можно минимизировать за счет соответствующего расположения боковых корпусов. Тримараны [32] обладают хорошими мореходными качествами, особенно при встречном носовом волнении. Вертикальная и килевая качка умеряется из-за увеличения отношения длины к водоизмещению основного корпуса. Из-за наличия боковых корпусов тримаран обладает большей живучестью при столкновении и повреждении. Боевой корабль – тримаран может дополнительно использовать наличие боковых корпусов как защиту жизненно важных пространств и снижение теплового поля выхлопных газов за счет охлаждения пространства между центральным и боковыми корпусами.

Волновое сопротивление тримаран может быть рассчитано по формуле Така и Лазаускаса (1998) [37] как описано в В.2.3. В частности, для числа идентичных корпусов $j = 3$ тримаран может рассматриваться дважды катамаран, что неприменимо, когда центральный корпус отличается от боковых. Волновая система в общей (x, y, z) и локальной (x_{j0}, y_{j0}, z_{j0}) системах координат может быть записана так;

$$\zeta_j(x,y) = Re \int A_j(\theta) \exp[(-ig/U^2 \cos^2 \theta)(x_{j0} \cos \theta + y_{j0} \sin \theta)] \cdot \exp[(-ig/U^2 \cos^2 \theta)(x \cos \theta + y \sin \theta)] d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$$

Волновая амплитуда для числа корпусов j ;

$$A(\theta) = \sum A_j(\theta) \exp[(-ig/U^2 \cos^2 \theta)(x \cos \theta + y \sin \theta)] d\theta; j = 1 \text{ до } 3 \text{ для тримарана}$$

Рассматривая действительные части приведенного выше интеграла можно вывести.

$$R_w = (\pi \rho U^2 / 2) \int |A(\theta)_{jdh}|^2 HIF_T(\theta)_j HIF_L(\theta)_j \cos^3 \theta d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$$

$$HIF_L(\theta) = \cos^2(gx/U^2 \cos(\theta))$$

$$HIF_T(\theta) = \cos^2[0.5(2p/L) \sin \theta / (Fn^2 \cos^2 \theta)]$$

Так и Лазауская выполнили подробные теоретические исследования, основанные на линейной теории, минимизируя волновое сопротивление за счет вариации продольного и поперечного расположения корпусов. При этом отдельные корпуса многокорпусного судна были приняты идентичными. Целью было минимизировать волновое сопротивление за счет оптимизации взаимного расположения корпусов и соответствующего взаимного гашения волновых систем, в частности чисто поперечных волн. Исследованы следующие конфигурации, для которых теоретические выкладки могут быть найдены в [37]:

- SAT - Катамаран с симметричными корпусами
- WEI - Катамаран не симметричный в поперечном направлении

TRI	- Симметричный в поперечном направлении тримаран (все корпуса идентичны)
ARR	- Тримаран в конфигурации стрелы (центральный корпус больше боковых)
TET	- Симметричный в поперечном направлении квадримаран
SLI	- Четырехкорпусное судно в конфигурации стрелы
DIA	- Четырехкорпусное судно в конфигурации бриллианта

Основные теоретические результаты приведены ниже и характеристики волнового сопротивления в функции от скорости модели для различных конфигураций системы корпусов приведены на Рис. В.21 и В.22 Приложения.

CAT, TRI и TET	– Обычно имеют высокое волновое сопротивление при малых скоростях
ARR, SLI и DIA	– Минимальное волновое сопротивление, взаимное погашение поперечных волн, а DIA имеет минимальное волновое сопротивление среди всех конфигураций практически при всех скоростях

В.2.5. Исследование результатов других авторов по волновому сопротивлению. В следующих параграфах рассматриваются другие работы по получению формул для определения волнового сопротивления.

В 1904 год Прандтль рассматривал вопросы определения волнового сопротивления с учетом вязкости с применением результатов разработанной им теории пограничного слоя. В районе 1908 года Хавелок выполнил несколько теоретических работ по определению гидродинамических характеристик моделей судов различной конфигурации с учетом волнообразования. Виглей и Вайнблум изготовили серию моделей судов специальной формы в 1920 году для апробации интеграла Мичеля путем сравнения теоретических результатов с экспериментальными данными.

Около 40 лет, начиная с 1937 российские ученые Сретенский, Кочин и Ханович исследовали работы Мичеля по волновому сопротивлению. В результате своих исследований Кочин пришел к уравнению, близкому к интегралу Мичеля. Другая работа выполнена в 1951 году Хавелоком, который рассчитал профиль волн далеко за кормой судна, а волновое сопротивление было получено путем расчета энергии, поддерживающей волновую систему. Для установления волновой картины, определения распределения давления и волнового сопротивления он применил концепцию источников и стоков для моделирования обтекания тел произвольной формы. Это исследование получило продолжение усилиями ряда известных ученых, включая Гэдда, Эггерса и других, которые в конечном итоге пришли к аналогичному математическому результату. Однако, многие из теорий, разработанных для решения задачи о волновом сопротивлении были к этому моменту применимы к только потенциальным потокам невязкой несжимаемой жидкости, случаям малого отношения ширины судна к его длине, малых отношений амплитуды волн к их длине, при условии положения судна на ровный киль и при соответствующих потенциальному течению граничных условиях.

В 1957 году Бхатачарья [8] рассматривал волновое сопротивление на глубокой воде ускоряющейся системы давлений. Он нашел выражение для возвышения свободной поверхности в следующем виде ;

$$\pi g p y = \int k V \psi(k) \exp(ik\hat{w}) dk \int \sin k V \tau \exp[-\mu\tau + ik\{cr + \frac{1}{2}f\tau(2t-r)\}] dr;$$

$$0 \leq k \leq x, 0 \leq r \leq t$$

$$\psi(k) = \int H(\hat{w}) \exp(ik\hat{w}) d\hat{w}; -\infty \leq \hat{w} \leq \infty$$

$$= 2 \int H(\hat{w}) \cos k\hat{w} d\hat{w}; 0 \leq \hat{w} \leq \infty \text{ and reduced to}$$

$$\psi(k) = A v^2 \exp(-\gamma k), \rho R_1 = A^2 g \exp(-2\gamma k_0), \rho R_2 = -\rho \check{R}_2 \sin[(\pi/4) - (p^2/4d)]$$

Горизонтальная составляющая сил давления в точке свободной поверхности ;

$$-p \sin \theta = -p \tan \theta = -H(\hat{w})(\delta y / \delta \hat{w})$$

При этом волновое сопротивление найдено в виде;

$$R = \int H(\hat{w})(\delta y / \delta \hat{w}) d\hat{w}; -\infty \leq \hat{w} \leq \infty$$

Где;

$$y = y_1 + y_2 + y_3$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_1 = (g/\rho v^4) [\psi(k_0)]^2$$

$$R_2 = (-t^2 \sqrt{g}) / (4c\pi^{1/2} d^{5/2} [\psi(p^2/4d^2)]^2 \sin[(\pi/4) - (p^2/4d)]$$

$$R_3 = 2 R_1$$

В середине 20 века линейная теория волнового сопротивления изучалась ведущими учеными различных стран, в том числе Лунда (Норвегия), Вехаузена (США), Андерсона (Швеция), Инуи, Баба, Маруо и Бесшо (Япония), Така и Доктора (Австралия), Эггерса (Германия) и др. Эти ученые начали применять методы определения волнового профиля и анализа следа и эксперименты, проводимые в опытовом бассейнах. В 1961 В.Г. Сизов из Одесского института инженеров морского флота, внес существенный вклад в изучение волнового сопротивления, где он впервые решил трудную задачу определения волнового сопротивления с учетом нелинейных эффектов второго порядка.

В период с 1962 по 1964 Гесс и Смит разработали панельный метод определения полей скоростей и давлений вокруг полностью погруженного тела произвольной формы. Это стало важным шагом в истории развития численных методов гидродинамики. С 1962 по 1968 год Инуи провел тщательные наблюдения волновых картин. Качественное измерение волновых параметров с целью определения волнового сопротивления было важной инициативой. Изучение и интерпретация волновых структур генерированных движущимися в воде судами дало интуитивные идеи для более объективного изучения волновых систем и волнового сопротивления.

Графф, Крахт и Вайнблум (1964) рассчитали коэффициент волнового сопротивления судна посредством интеграла Мичеля для различных моделей при различных значениях осадки и сравнили полученные результаты с коэффициентом остаточного сопротивления найденным экспериментально. Сравнение результатов теории и эксперимента также были проведены Тейлором и Гертлером. Результаты представлены на Рис. В.5. При этом можно видеть расхождения между результатами теоретических расчетов и данными эксперимента.

Теоретические работы по нелинейным подходам к вычислению волнового сопротивления были выполнены Икехатой (1965), Эггерсом (1966) и Маруо (1966). Йим (1968) и Вехаузен (1969), который не писал фундаментальные работы по теории волнового сопротивления второго порядка с другими граничными условиями. В 1969 Баба предложил рассмотреть новую составляющую сопротивления по результатам теоретических и экспериментальным исследованиям полного сопротивления судов. Путем определения потери полного напора, он оценил дополнительную потерю количества движения вне следа. Предварительные теоретические исследования этой составляющей показали, что она управляется законом подобия Фруда. Изучение этой составляющей позволило ученым объяснить тот факт, что волновое сопротивление, определяемое традиционными методами представлялось слишком малым по сравнению с разностью полного и вязкостного сопротивления.

В 1976 году Гэдд выдвинул свою идею о том, что для удовлетворения нелинейных граничных условий на свободной поверхности можно применить распределение гидродинамических особенностей, то есть такой же метод как и при моделировании обтекания корпуса судна. Используя этот подход Гэдд учел нелинейные эффекты на свободной поверхности и применил точные граничные условия на поверхности тела. В 1977 году Доусон написал компьютерную программу для расчета волн и волнового сопротивления. Работа Доусона стала основой большинства вычислительных оценок волнового сопротивления посредством компьютерных программ, что сегодня является основным инструментом расчета волнового сопротивления судна. Увеличение мощности вычислительной техники стимулирует впечатляющий прогресс численных методов. Решение математических задач по оценке волнообразования стало значительно менее трудоемким по сравнению с использованными ранее методами «ручного счета».

Потенциальная теория, разработанная для безграничной жидкости остается важным инструментом для получения предварительной информации для случая исчезающе малых чисел Фруда в рамках аппроксимации дублированного корпуса. В 1964 Гесс и Смит сделали исторический шаг в части развития вычислительной гидродинамики (CFD). Метод Гесса и Смита использует весьма строгий потенциальный метод панелей и сегодня включается в расчетные программы широко используемые многими исследователями. Усовершенствования в части введения криволинейных панелей также предлагались Ся (1986), Ни (1987), и Кимом (1989) из Чальмерского технологического университета. Все эти программы основаны на конечно-объемной дискретизации осредненных уравнений Рейнольдса (RANS) и уравнения сохранения масс. Ляховицкий (1976) и (2007), основываясь на обобщенном волновом интеграле Мичеля аппроксимировал выражение для волнового сопротивления катамарана с тонкими боковыми корпусами при безразмерном клиренсе b , движущемся в невязкой жидкости произвольной глубины посредством следующего интеграла:

$$R_h' = R_h / gA = (2F_h \hat{h} / \pi \delta B T) \int \{ [P_s^2 + Q_s^2] \gamma / [\cosh^2 \gamma \hat{h} \sqrt{(F_h^2 \gamma^2 \hat{h}^2 - \gamma \hat{h} \tanh \gamma \hat{h})}] \cdot \\ \cdot [1 + \cos \{ (2b \sqrt{(F_h^2 \gamma^2 \hat{h}^2 - \gamma \hat{h} \tanh \gamma \hat{h})} / F_h \hat{h}) \}] d\gamma; \gamma_0 \leq \gamma \leq \infty$$

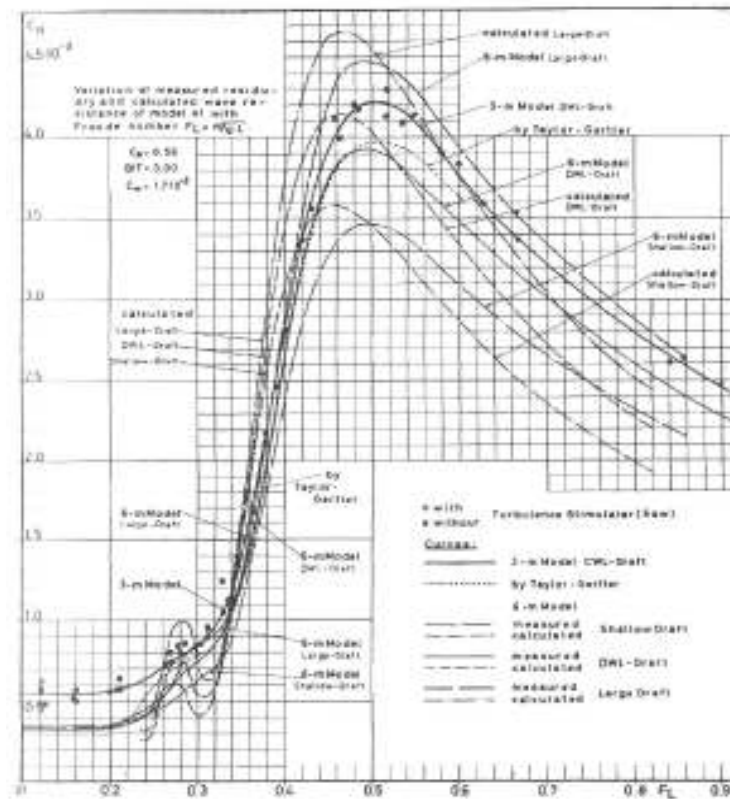


Рис. В.5. – Сравнение результатов полученных посредством интеграла Мичеля в сравнении с результатами метода Тейлора-Гертлера и экспериментальными данными

$$P_S = \iint (\partial f_S / \partial x) \cosh\{\gamma(z + \hat{h})\} \cos\{(x/\hat{h}F_h)\sqrt{(\gamma\hat{h} \tanh \gamma\hat{h})}\} dx dz; \\ -1/2 \leq x \leq 1/2, -T \leq z \leq 0$$

$$Q_S = \iint (\partial f_S / \partial x) \cosh\{\gamma(z + \hat{h})\} \sin\{(x/\hat{h}F_h)\sqrt{(\gamma\hat{h} \tanh \gamma\hat{h})}\} dx dz; \\ -1/2 \leq x \leq 1/2, -T \leq z \leq 0$$

В 2006 году Саху, Докторс и Претлав применили методы вычислительной гидродинамики для расчета гидродинамических характеристик катамарана с различными параметрами взаимного расположения корпусов [36], используя компьютерные программы Hydros и ShipFlow и провели сравнение с экспериментальными данными. Полное сопротивление катамарана было записано следующим образом:

$$C_{TCAT} = (1 + \phi k)\sigma C_F + \tau C_W$$

$$(1 + \phi k)\sigma = (1 + \gamma k)$$

$$C_{TCAT} = (1 + \gamma k)\sigma C_F + \tau C_W$$

Для изолированных корпусов, $\gamma = 1$, $\tau = 1$

$$Cw^* = R^* / F_n^2$$

$$R^* = R_w / [(8\rho g/\pi)(B^2 T^2/L)]$$

$$R_T = 2[(1 + k) R_F + R_w]$$

Компьютерный код ShipFlow основан на трех методах; а именно метод потенциального потока в Зоне 1 (непрерывные линии тока), метод пограничного слоя в Зоне 2 (переходная зона) и метод Навье-Стокса в Зоне 3 (турбулентный поток) как показано на Рис. В.19. Результаты расчета полного сопротивления с применением компьютерных программ и экспериментов приведены на Рис. В.20 (а) - В.20 (с) Приложения.

Эггерс и Гамст [10] в 1978 году со ссылкой на пионерскую работу Гийотона провели оценку процедур отображения для случая стационарной волновой задачи для судна с целью усовершенствования линейной теории тонкого судна. Во всех случаях полученные данные по волновому сопротивлению хорошо согласуются с экспериментально определенным остаточным сопротивлением. Используемые методы были основаны на теории тонкого судна и метода Жозефа возмущений границ области. Решение включает потенциал скорости ϕ и возвышение свободной поверхности Z (в пренебрежении посадкой).

$$\phi = \sum \phi_i \varepsilon^i; 0 \leq i \leq \infty$$

$$Z = \sum Z_i \varepsilon^i; 0 \leq i \leq \infty$$

ϕ_i and Z не зависят от ε , где параметр ε выбран как отношение ширины судна к его длине

В 1981 году Б. Йим [22] представил свое исследование с применением лучевой теории нелинейных волн и волнового сопротивления на Третьей международной конференции по численным методам судовой гидродинамики, Париж, 16-19 июня 1981 года. Он применил аналитические и численные методы для применения лучевой теории при расчете судовых волн и волнового сопротивления. Когда вершина волны касается поверхности судна, луч следует за судном. Когда вершина волны почти перпендикулярна к поверхности судна луч многократно отражается при движении вдоль поверхности судна. Волновое сопротивление судна Виглея было рассчитано с использованием амплитудной функции из теории тонкого судна Мичеля и сравнивалось сопротивлением, найденным из волнового интеграла Мичеля. На кривой полного сопротивления фазы максимумов и минимумов существенно различаются. Лучевая теория используется в геометрической оптике или для волн очень малой длины. В линейной теории гладкое распределение источников порождает две системы регулярных корабельных волн, а именно носовую и кормовую системы волн, начинающихся от носа и кормы соответственно и представляемые следующим образом;

$$\zeta(x; y) = A(\theta) \exp \{i s_I(x, y, \theta)\} d\theta$$

$$s_I = k_0 \sec^2 \theta \{(x - x_i) \cos \theta + y \sin \theta\}$$

Где;

x_i абсцисса носа или кормы

$$k_o = g/U^2$$

g – гравитационное ускорение

$A(\theta)$ - амплитудная функция, зависящая от распределения источников

$$A(\theta) = P(\theta) + iQ(\theta)$$

$$P + iQ = \int \int_R dx \cdot dz f_x \exp(k_o z \sec^2 \theta) \sec^3 \theta \exp(ik_o x \sec \theta); \quad y = \pm f(x, z)$$

Рассматривалось судно, представленное распределением $m = (1/2 \text{ л}) (dy/dx)$ источников по дублированной модели $m(x, y)$ на $y = 0, h > z > -h$.

В действительной дублированной модели судна уравнение линий тока, огибающих корпус судна, дается формулой $dy/dx = v/u$

Носовые волны;

$$\zeta_b = \int_R A_b(\theta) \exp\{is_l(\theta)\} d\theta$$

$$A_b(\theta) = P_b + iQ_b$$

Волна с фазой $s_{2b}(\theta)$ имеет амплитуду;

$$(P_b + iQ_b) \exp(ik_o s_{2b}(\theta))$$

Формула Хавелока для определения волнового сопротивления;

$$R/(\rho/U^2 L^2) = C_w = (1/4) \int_R |(P_b + iQ_b) \exp(ik_o s_{2b}(\theta))|^2 \sec^3 \theta d\theta$$

или, следуя формуле Сретенского;

$$C_w = 16 \pi^2 k_o / w \sum \varepsilon_j \left[\frac{1 + \int 1 + (4 l_j / k_o w)^2 \}^{1/2} / \{ 1 + (4 l_j / k_o w)^2 \}^{1/2}]}{|A_b d_j \exp(ik_l s_{2b}(d_j))|^2}$$

Где;

$$|A_b d_j \exp(ik_o s_{2b}(d_j))|^2 = \int \int_R dx \cdot dz m \exp\{k_o d_j (z d_j + ix) + ik_o s_{2j}\}$$

$$m = f_x / 2 \text{ л}$$

$$d_j = [1/2 + 1/2 \{ 1 + (4 l_j^2 / k_o w)^2 \}^{1/2}]^{1/2} = \sec \theta_j$$

w = ширина опытового бассейна, отнесенная к длине судна L

Амплитуда кормовой волны совпадает со своим значением по линейной теории;

$$A_s(\theta) = P_s + iQ_s$$

Полное волновое сопротивление может быть найдено аналогичным образом путем рассмотрения полной амплитуды волны;

$$(P_b + iQ_b) \exp(ik_o s_{2b}(\theta)) + (P_s + iQ_s) \exp(ik_o s_{2b}(\theta) - \sec \theta)$$

В 1983 году Сангсеон Дзю [11] продолжил изучение полного и вязкостного сопротивления моделей с параболическим корпусом Виглея. При этом влияние

формы корпуса с точки зрения отрыва потока, сопротивления давления, вихреобразования и следа не рассматривалось. Вязкостное сопротивление определялось путем измерений параметров следа, а разность между полным и вязкостным сопротивлением сопоставлялась с остаточным сопротивлением. Метод форм-фактора подтвердил правильность экспериментальных результатов. Волновое сопротивление было найдено посредством анализа волновой картины за корпусом. Метод форм-фактора определяется следующими соотношениями ;

Форм-фактор $(1+k)$,

$$1+k = C_v/C_f$$

Коэффициент трения C_f ,

$$(0.242/\sqrt{C_f}) = \log_{10}(Re \cdot C_f)$$

Коэффициент полного сопротивления C_t ,

$$C_t = (1+k)C_f + C_w$$

Уравнения параболического корпуса Виглея;

$$y = (B/2)[1-(2x/L)^2][1-(z/H)^2]; -L/2 \leq x \leq L/2, -H \leq z \leq 0$$

Вязкостное сопротивление R_v выражается следующим;

$$R_v = [(\rho/2)/(2-(U_e/U_o))] \int_w [2g(H_o-H_m)-(U_e-U_m)] dS$$

В 1986 году Аанесланд [12] применил для расчета волнового сопротивления пространственный гибридный метод панелей. Он использовал теорию пространственного стационарного потенциального потока с источниками и стоками. Волновое сопротивление рассчитывалось путем интегрирования давлений по смоченной поверхности в проекции на продольное направление в комбинации с интегрированием по контрольной поверхности. Апробация этого метода была проведена для корпусов Виглея и корпусов 60-ой серии. При этом волновое сопротивление определялось по выражению ;

$$F = \int p(x,y,z) n dS;$$

А давление – по формуле $p = (-\rho/2)[(\nabla \phi)^2 - U^2] - \rho g z$

Корпус описывался уравнением;

$$y_I = \pm h(z_I, x_I), y_I = y, x_I = z \cos \alpha - (z-\delta) \sin \alpha, z_I = z \sin \alpha + (z-\delta) \cos \alpha$$

В 1989 году Так [13] провел вычисления с помощью интеграла Мичеля с целью продемонстрировать важность этой формулы в корабельной гидродинамике. При этом сила сопротивления на стационарно движущемся судне приравнивалась потере энергии, связанной с созданием волн. Вязкость не

учитывалась, то есть использовалась классическая теория невязкой жидкости в предположении, что течение почти всюду безвихревое и что существует потенциал скорости, так что можно поставить краевую задачу для уравнения Лапласа $\phi_{xx} + \phi_{yy} + \phi_{zz} = 0$, в области $|y| > \eta$, $z < \zeta$. При этом, граничные условия, а именно кинематическое условие $\phi_z = \phi_x \zeta_x + \phi_y \zeta_y$, выражающее условие непротекания поверхностей тока, и динамическое условие, диктуемое интегралом Эйлера $2g\zeta + \phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2 = U^2$, должны удовлетворяться на (неизвестной) свободной поверхности $z = f(x, y)$. В связи с квадратичным характером интеграла Эйлера эта задача Неймана-Стокса является нелинейной, причем свободная поверхность $z = f(x, y)$ заранее неизвестна. Для тонкого судна линейризованное условие непротекания на корпусе (при $y = 0$) имеет вид $\phi_y = U\eta z$, а линейризованное условие на свободной поверхности (при $z = 0$) записывается как $g\phi_z + U^2\phi_{xx} = 0$.

В 1998 году П.Р. Коузер, Дж. Ф. Велликом и А.Ф. Молланд [14] разработали усовершенствованный метод теоретического определения волнового сопротивления корпусов с транцевой кормой, используя концепцию узкого тела в оригинальной трактовке Инсела (1992), где волновое сопротивление рассчитывалось по параметрам волновой системы вниз по потоку с применением коэффициентов Эггера. В этом новом методе допускалось моделирование обтекания дополнительных устройств за кормовой оконечностью. Оригинальное уравнение Инсела было переписано чтобы явным образом выделить мощность источников, рассчитываемую в дальнейшем панельным методом. Оригинальная запись мощности источников на некоторой панели поверхности корпуса предполагает пропорциональность наклону ватерлинии.

$$\sigma = (U_x/2\pi)(dy/dx) \times \text{площадь проекции панели на плоскость } y = 0;$$

где;

dy/dx характеризует наклон ватерлинии, U_x есть продольная составляющая скорость набегающего потока

В новой записи мощность источников имеет вид; $\sigma = (-1/2\pi) \vec{n} \cdot \vec{U} \times \text{площадь панели}$,

где $\vec{n}$ есть единичный вектор внешней нормали данной панели $\vec{U} = (U_x, U_y, U_z)$ есть полная скорость набегающего потока. Преимущество введения нового выражения для мощности источников состояло в том, это определение имело смысл даже в том случае, когда наклон (dy/dx) стремиться к бесконечности, а проекция площади панели стремиться к нулю, как это имеет место, например, на транце. Сопротивление источников зависит от волновой гармонике с индексом m ; чтобы получить волновое сопротивление по параметрам волн использовалось примерно 100 – 150 гармоник.

Выражение для волнового сопротивления в функции волновых гармоник имеет вид;

$$R_{WP} = (\rho g B/4) \{ \zeta_0^2 [1 - [2k_0 H / \sinh(2k_0 H)]] + \sum \zeta_m^2 [1 - (\cos^2 \theta_m / 2) / [1 - [2k_m H / \sinh(2k_m H)]] \}$$

Четная составляющая волновой амплитуды m – той гармонике;

$$\xi_m = (16\pi U/Bg)(k + k_m \cos^2 \theta_m)/(1 + \sin^2 \theta_m - k H \operatorname{sech}^2(k_m H)) \sum_{\sigma} \sigma_{\sigma} e^{-k_m H} \cdot \cosh[k_m(H + z_{\sigma})] |\cos(k_m x_{\sigma} \cos \theta_m)| \cos(m\pi y_{\sigma}/B)$$

Нечетная составляющая волновой амплитуды m -той гармоники;

$$\eta_m = (16\pi U/Bg)(k + k_m \cos^2 \theta_m)/(1 + \sin^2 \theta_m - k H \operatorname{sech}^2(k_m H)) \sum_{\sigma} \sigma_{\sigma} e^{-k_m H} \cdot \cosh[k_m(H + z_{\sigma})] |\sin(k_m x_{\sigma} \cos \theta_m)| \sin(m\pi y_{\sigma}/B)$$

Где;

$$k_m - k \sec^2 \theta \tanh(k_m H) = 0$$

$$k_m \sin \theta_m = m\pi y/B$$

Для получения полного волнового сопротивления при вычислении сопротивления системы источников следует учесть гидростатическую поправку на геометрию транцевой кормы. Сопротивление транца рассчитывалось путем интегрирования статических давлений на транцевой корме:

$$R_{trans} = \rho g \int z \cdot b(z) dz ; 0 \leq z \leq T_{trans}$$

Где;

T_{trans} есть осадка на транце, а $b(z)$ представляет собой полуширину транца на глубине z

Традиционная формула для определения волнового сопротивления на основе метода форм-фактора имеет вид ;

$$C_W = C_T - (1 + k)C_F$$

Особое внимание уделялось конфигурации модели в районе транца, а результаты сравнивались с экспериментальными данными, полученными путем измерений. Кроме того полученные результаты сравнивались с данными расчета по программам, учитывающим криволинейность панелей второго порядка. Эксперимент и расчетные методы более высокого порядка хорошо коррелировались. Предложенный метод по сравнению с методами более высокого порядка потребовал меньше вычислительных ресурсов без потери точности .

В большей части исследований и анализа волнового сопротивления, выполненных в 2000-х методы, разработанные учеными в прошлом, применялись к судовым корпусам различной формы и конфигурации (однокорпусные и многокорпусные), используемым в настоящее время. В следующих параграфах в хронологическом порядке дано краткое описание некоторых из этих исследований.

Селеби произвел расчет нестационарной нелинейной задачи о волнообразовании, вызванном движением, судна с использованием адаптивных алгоритмов в работе [15] 2000 года и учетом кинематического условия на непрерывно меняющейся поверхности корпуса судна. При этом для решения полной нелинейной задачи использовался комбинированная схема Эйлера-Лагранжа (Longuet-Higgins & Cokelet (1976)). В основе метода лежит пошаговое

во времени использование условия на свободной поверхности. Учитывается, что значение потенциала на свободной поверхности (условие Дирихле) и его нормальной производной на поверхности тела (условие Неймана) также известны. Эта хорошо определенная краевая задача может решаться с применением различных численных методов. Далее, на следующем шаге по времени, кинематическое и динамическое условия на свободной поверхности применяются вновь. Для решения соответствующей смешанной краевой задачи используется неявный регуляризованный метод граничных интегральных уравнений (Цао, Шульц, Бек, 1991). Жидкость полагается невязкой, а течение безвихревым, то есть потенциальным во всей области жидкости. Поверхностное натяжение на свободной поверхности не учитывается. Потенциал скорости относительного движения записывается как;

$$\Phi = U_o(t)x + \Phi(x,y,z,t)$$

Кинематическое условие на смоченной поверхности тела ,

$$\partial\Phi/\partial n = U_o(t)n_x + V_H n, \text{ on } S_H$$

Где V_H есть скорость тела с учетом его вращения по отношению к системе координат $Oxyz$. Кинематическое условие на плоском дне таково;

$$\partial\Phi/\partial n = 0 \text{ on } S_B$$

Кинематическое и динамическое граничные условия удовлетворяются на мгновенном положении свободной поверхности. Нормальные составляющие скоростей жидкости и точек свободной поверхности равны ;

$$\partial\eta/\partial t = -\nabla\Phi + \partial\Phi/\partial z + U_o(t)\partial\eta/\partial x \text{ on } S_F$$

Где;

$$z = \eta(x, y, t) \text{ есть возвышение свободной поверхности}$$

Нормальное напряжение на свободной поверхности равно атмосферному давлению P_a . Динамическое граничное условие в соответствии с интегралом Лагранжа принимает вид ;

$$\partial\Phi/\partial t = -g\eta - 1/2 [\nabla\Phi]^2 - U_o(t) \partial\eta/\partial x - P_a/\rho \text{ on } S_F$$

где ρ есть плотность жидкости, а g – ускорение свободного падения. Граничное условие на части границы далеко вниз по потоку с учетом затухания возмущений записывается как;

$$\nabla\Phi \rightarrow 0 \text{ на } S_\infty$$

$$\Phi = 0 \text{ в области течения при } t = 0$$

$$\eta = 0 \text{ на } S_F \text{ при } t = 0$$

Если v принять равной $(U(t), V(t), d\eta/dt)$ расчетная точка движется по заданной траектории со скоростью $(U(t), V(t))$ в плоскости x - y и перемещается вертикально

вместе со свободной поверхностью. Тогда, записанные выше уравнения приводятся к следующим;

$$\partial\eta/\partial t = -\nabla\Phi \cdot \nabla\eta + U(t) \partial\eta/\partial x + V(t) \partial\eta/\partial y + \partial\Phi/\partial z - U_o(t) \partial\eta/\partial x \text{ на } S_F \text{ и}$$

$$\partial\Phi/\partial t = -g\eta - \frac{1}{2}[\nabla\Phi]^2 - U(t) \partial\Phi/\partial x + V(t) \partial\Phi/\partial y + \partial\eta/\partial t \cdot \partial\Phi/\partial z - U_o(t) \partial\eta/\partial x - P_a/\rho \text{ на } S_F$$

Полагая скорость потока $U_o(t) = 0$, получим

$$\partial\eta/\partial t = -\nabla\Phi \cdot \nabla\eta + U(t) \partial\eta/\partial x + V(t) \partial\eta/\partial y + \partial\Phi/\partial z \text{ на } S_F \text{ и}$$

$$\partial\Phi/\partial t = -g\eta - \frac{1}{2}[\nabla\Phi]^2 - U(t) \partial\Phi/\partial x + V(t) \partial\Phi/\partial y + \partial\eta/\partial t \cdot \partial\Phi/\partial z - P_a/\rho \text{ на } S_F$$

Гидродинамические силы и моменты определяются по формулам;

$$F = \iint_{SB} P n_B dS$$

$$M = \iint_{SB} P (r \times n_B) dS$$

$$n_B = (n_1, n_2, n_3), r \times n_B = (n_4, n_5, n_6)$$

r и n_B представляют собой соответственно вектор положения и единичный вектор нормали (направленный внутрь тела) к поверхности тел. Полное давление на смоченной поверхности тела дается интегралом Лагранжа;

$$P/\rho = -gz - \frac{1}{2}(\nabla\Phi \cdot \nabla\Phi) - \partial\Phi/\partial t + v \cdot \nabla\Phi$$

В 2002 году Е.О. Так, Д.С. Скуллен и Л. Лазаускас [16] выполнили исследование волновых структур с целью минимизации волнового сопротивления скоростных судов. Поле течения и профили волн рассчитывались как в ближнем так и в дальнем поле движущегося возмущения малой амплитуды, моделирующего движение судна, посредством эффективных расчетных процедур для пространственного источника Хавелока в диапазоне скоростей, соответствующем максимальному волнообразованию ($0.4 < F < 1.0$). Для тел, движущихся в жидкости бесконечной глубины с постоянной скоростью U с пересечением свободной поверхности или под ней были проведены подробные и достаточно точные расчеты стационарных полей течения, волновых профилей и волнового сопротивления. Предполагалось, что рассматриваемые тела должны быть малыми в том смысле, что условие на свободной поверхности может быть линеаризовано. Такие ситуации имеют место во многих случаях, включая случаи тонкого судна, катамарана, подводной лодки, судна на воздушной подушке, глиссирующих судов, судов с малой осадкой и т.д. Жидкость считалась невязкой и несжимаемой, поток безвихревым, что позволяет моделировать течение посредством распределения источников Хавелока, которые представляют собой точечные источники в присутствии свободной поверхности. Потенциал точечного источника Хавелока с единичной мощностью (Хавелок 1917, 1928, Вехаузен и Лейтон 1962), расположенного в точке $(x; y; z) = (0; 0; \zeta)$ может быть записан в виде:

$$G(x; y; z; \varsigma) = -(1/4\pi^2) R \int d\theta \int dk \exp(-ik(x \cos \theta + y \sin \theta) [\exp(-k|z - \varsigma|) - \{(k + k_0 \sec^2 \theta)/(k - k_0 \sec^2 \theta)\} \exp(-k(z + \varsigma))])$$

где $k_0 = g/U^2$. Путь интегрирования по k выбирается с обходом полюса в точке $k = k_0 \sec^2 \theta$, так что волны имеют место только при $x > 0$. Первое слагаемое в квадратных скобках представляет собой поправку на свободную поверхность и удовлетворяет линеаризованному условию Кельвина на свободной поверхности $G_{xx} + k_0 G_z = 0$, на $z = 0$. Согласно Ньюмену (1987) полиномиальная аппроксимация «локальной» части источника Хавелока имеет вид;

$$G^L(x, y, z; \varsigma) = G(-|x|, y, z; \varsigma)$$

Записанная выше функция является четной по отношению x , что идентично значению G при $x < 0$, то есть перед источником, так что она не является волновой. Таким образом, функция $G = G^L + G^F$, где часть G^F , соответствующая дальнему полю, равна нулю для $x < 0$, а для $x > 0$ равна $-2\pi i$ умноженному на вычет в полюсе, а именно;

$$G^F(x, y, z; \varsigma) = (k_0/\pi) \int \sec^2 \theta \exp(k_0(z + \varsigma) \sec^2 \theta) \sin(k_0 x \sec \theta) \cos(k_0 y \sec^2 \theta \sin \theta) d\theta$$

$$\Phi(x; y; z) = 2U \iint_R d\zeta d\varsigma Y_\zeta(\zeta; \varsigma) G(x - \zeta, y, z; \varsigma)$$

Запишем потенциал с учетом структуры источника Хавелока $G = G^L + G^F$ соответственно как $\Phi = \Phi^L + \Phi^F$

$$\Phi^F(x; y; z; \varsigma) = (2Uk_0/\pi) \int \sec^3 \theta \exp(k_0 z \sec^2 \theta) \cos(k_0 y \sec^2 \theta \sin \theta) d\theta - [P \cos(k_0 x \sec \theta) + Q \sin(k_0 x \sec \theta)]$$

Где,

$$P + iQ = (1/-i k_0 \sec \theta) \int_R d\varsigma \int d\zeta Y_\zeta(\zeta; \varsigma) \exp(ik_0 \zeta \sec \theta + k_0 \zeta \sec^2 \theta)$$

В отсутствие транцевой кормы и при $x > x_S$, интегрирование по частям приводит к простой формуле для $P + iQ$, включающую уравнение корпуса Y , так что

$$P + iQ = \iint_R Y(\zeta; \varsigma) \exp(k_0 \zeta \sec^2 \theta + ik_0 \zeta \sec \theta) d\zeta d\varsigma$$

Если есть транец при $Y(x_S; \varsigma) > 0$, или если $x_B < x < x_S$, имеет место существенный дополнительный интегральный вклад, который учитывается в расчетах. Подъем свободной поверхности равен $z = Z(x; y) = -(U/g)\Phi_x(x; y; 0)$, и главной выходной величиной является волновой профиль, получаемый в виде контурных кривых $Z(x; y)$. Однако, $x_E = x_S$ можно непосредственно получить и формулу для определения волнового сопротивления, которая напоминает интеграл волнового сопротивления Мичеля.

$$R_w = (2\rho U^2 k_0^4/\pi) \int [P^2 + Q^2] \sec^5 \theta d\theta; -\pi/2 < \theta < \pi/2$$

Обобщение этого подхода позволяет принять во внимание вязкостное демпфирование волн далеко вниз по потоку. Дальнее поле может рассматриваться как суперпозиция плоских волн, движущихся под углами θ к оси x , и имеющих амплитуду $P + iQ$, и при рассмотрении этих плоских волн необходимо применить подходящие демпфирующие коэффициенты (Lamb 1932, p. 624). Мы нашли, что в работах Така и др. 2002, Маруо 1976, уравнение (92), а также Камбербача 1965, Зильмана и Мило 2001 этот коэффициент принимается в виде;

$$\exp[(4vk_0^2/U) \sec^5 \theta (x \cos \theta + y \sin \theta)]$$

Тогда потенциал скорости заданного на области R плоскости $z = 0$ распределения давления $p(x; y)$ равен;

$$\Phi(x; y; z) = (U/\rho g) \iint_R d\xi d\eta p(\xi; \eta) G_x(x - \xi, y - \eta, z; 0)$$

$$P + iQ = (1/2\rho U^2 k_0) \iint_R p(x, y) \exp(ik_0 x \sec \theta + ik_0 y \sec^2 \theta \sin \theta) dx dy$$

Безразмерный коэффициент волнового сопротивления равен;

$$C_D = \rho g R_W / 2 b p_o^2$$

«Биквадратичное» распределение давления задается в виде;

$$p(x, y) = (9/4 p_o) [1 - (x/a)^2] [1 - (y/b)^2]$$

Записанное выше распределение давления параболически убывает до нуля по периметру прямоугольника. Здесь p_o есть среднее давление, т.е. такое которому соответствует такая же подъемная сила $4ab\rho_0$ как и при постоянном давлении p_o . Таковы применения линейной теории волн и примеры расчетов течений и волновых профилей для скоростных судов. Представляется, что речь идет о первой в 21 веке вычислительной реализации теории Мичеля тонкого судна, предложенной в 19 веке (1898). Результирующая программа расчета позволяет проводить расчеты быстро и с малой погрешностью и способная обнаруживать подробности волновой картины, которые трудно выявить другими методами. В частности, линеаризация предоставляет целый ряд преимуществ, главное из которых в том, что линейная теория практически всегда работает. Вторым полезным приложением оказалась задача о движении заданного распределения давления, в которой также удастся достаточно подробно описать течение как в ближнем так и в дальнем поле.

А.Ш. Готман [17] рассмотрела учет влияния вязкости на взаимодействие носовой и кормовой волновых систем с применением варианта линейной теории Мичеля и эксперимента в 2002 году. С применением модифицированного интеграла Мичеля и других соотношений получен ряд теоретических результатов для ряда моделей, проведено сравнение с экспериментом. Эксперименты проводились с целью выявления влияния двух стоек и показали, что часть энергии при обтекании носовой части судна дает вклад в турбулизацию потока и не влияет на носовую и кормовую волновые системы судна. Разделяя основную и осциллирующую части интеграла Мичеля в его новой форме, можно обнаружить аномальные характеристики волнового сопротивления и волновых профилей при

малых и больших скоростях. Нерегулярный характер экспериментальных данных для того же параболического корпуса Виглея, полученные в различных опытовых бассейнах были связаны с различными степенями турбулентности во время проведения испытаний. Из различных волновых интегралов было найдено, что формы корпуса с боковыми бульбами на миделе приводит к минимальному волновому сопротивлению по сравнению с упрощенными формами корпусов с цилиндрическими вставками которые показали максимальное волновое сопротивление. При таких же обозначениях как в [17] полученный из оригинального интеграла Мичеля вариант формулы для определения волнового сопротивления был записан в виде

$$R_w = (4pg^2/\pi v^2)(B/2)^2 \cdot T^2 \times Re \int J_1(k,p) \cdot J_2(k,p)(d\theta/\cos^3 \theta)$$

$$R_w = (4pg^2/\pi v^2)(B/2)^2 T^2 (I_1 + I_2)$$

Для различных осадок было получено;

$$R_w = (4pg^2/\pi v^2)(B/2)^2 T^2 (Q_1 + Q_2)$$

В 2002 году Вень Синь и Хань Хоуд [18] рассчитали волновое сопротивление судна посредством так называемого граничного метода. Этот расчет был проведен для судна, движущегося с постоянной скоростью с пересечением свободной поверхности воды с применением теории линеаризованного стационарного потенциального потока. При решении вариационной задачи методом конечных элементов одна вертикальная грань использовалась как искусственная граница области вверх по потоку и две вертикальные грани – как искусственные границы вниз по потоку. Волновое сопротивление рассчитывалось путем с применением численной аппроксимации потенциального потока вокруг корпуса. Формула для определения волнового сопротивления судна на основе теории потенциального потока имеет вид ;

$$F_x = - (1/2) \{ \iint [(\phi_x)^2 - (\phi_y)^2 - (\phi_z)^2] dydz - \mu^2 [(\phi_x)^2]_{z=0} dy \} |_{x=r}$$

$$\text{При упрощении } F_x \approx (1/2) \rho \sum \{ (\beta^m_0)^2 + (\alpha^m_0)^2 \} [K2, m + K3, m]$$

Форма корпуса определяется как;

$$y - (c/2) = \pm (B/2) [1 - (z/D)^2] [1 - (2x/L)^2] [1 - \zeta(2x/L)^2]; x < L/2, -D < z < 0, \zeta = 0.6$$

Где ;

ϕ есть потенциал обтекания судна

$$(\mu_2 \phi_{xx} + \phi_z)|_{z=0} = -\mu P_x / (\rho \sqrt{g}) \quad -\infty \leq x \leq +\infty, \quad 0 \leq y \leq c$$

$$\phi_z|_{z=-I} = 0 \quad -\infty \leq x \leq +\infty, \quad 0 \leq y \leq c$$

$$\phi_y|_{y=0} = 0 \quad -\infty \leq x \leq +\infty, \quad -I \leq z \leq 0$$

$$\phi_y|_{y=c} = 0 \quad -\infty \leq x \leq +\infty, \quad -I \leq z \leq 0$$

$$C_w = (250/\pi) F_x / \Omega_{ship}^{2/3} \rho g \mu^2$$

$$\Omega_{ship} = (44/225) LBD, \text{ есть объем смоченной части судна}$$

Задача нахождения потенциала потока сведена к задаче, определенной в области вычислений и решается методом конечного элемента .

В 2003 году Настя Дегиули, Андреа Вернер и Здравко Долинер [19] in 2003 провели эксперименты в опытовом бассейне с целью определения волнового спектра и волнового сопротивления на основе измерений волновых профилей за моделью тримарана с параболическим корпусом Виглея в диапазоне чисел Фруда от 0.254 до 0.420 при 12 пробегах тележки. Определение сопротивления на основе измерений в следе осуществлялось методами Ландвебера (1963, LFT), Баба (1969, MES) и Хогбена (1972, 1975, MEM). Все методы, основанные на определении частотного спектра и его составляющих дали одинаковые результаты. Коэффициент волнового сопротивления, вычисленный по волновым профилям, дается выражением;

$$C_{wp} = R_{wp}/(\frac{1}{2}\rho c^2 S) = (k_o b/2S) [\sum \{ \sqrt{(1 + 4t_m^2)} / (1 + \sqrt{(1 + 4t_m^2)}) \} (A_m^2 + B_m^2)$$

Обозначения;

- R_{wp} – сопротивление, найденное по профилю волн
- P – плотность воды
- S – площадь смоченной поверхности судна без хода
- A_m, B_m – дискретные значения амплитудных компонентов спектра свободных волн
- k_o, t_m – дискретное значение y -вой компоненты волнового числа
- $K = g/c^2$ – фундаментальное волновое число

В 2008 году Ян, Йе и Фэнг [20] опубликовали расчетное исследование нелинейной задачи о волнообразовании при движении корпуса Виглея во временной области с использованием теоремы Грина. При этом источники и диполи размещались на граничных поверхностях (т.е. поверхности судна и свободной поверхности) и применялась схема временных шагов уникальность этой схемы в том, что стационарное состояние может быть достигнуто посредством использования схемы временных шагов из начального состояния и нестационарных условий на свободной поверхности. После нескольких расчетов задача о нестационарном течении стабилизировалась. Эту модель можно применить к стационарным и нестационарным задачам. В работе дано подробное описание как теоретических рассуждений, так и вычислительного процесса. Анализировались линейные и нелинейные граничные условия на поверхности судна Виглея и их влияние на волновое сопротивление и профиль волн. Метод во временной области, как было показано, оказался надежным и реализуемым численно.

В 2008 году Чжан Бао-цзи, Ма Кунь, Цзи Чжуо-шан [21] выполнили анализ оптимизации формы корпуса минимального волнового сопротивления с применением метода источников Ранкина. Метод источников Ранкина представляет собой численный метод определения волнового сопротивления, использующий вместо однородного потока, набегающего на тонкое судно, обтекание дублированной модели. Выполнен теоретический расчет с целью определения формы корпуса, обеспечивающий минимальное волновое сопротивление и базирующийся на представлении, что полное сопротивление представляет собой сумму вязкостного сопротивления и волнового сопротивления. Для скоростных судов волновое сопротивление составляет большую часть полного сопротивления.

Потенциал скорости;

$$\phi = \phi_0 + \phi_I$$

$$\phi_0 = Ux - \iint_{S_0} \sigma_0(x', y', z') (1/r_0) dS$$

$$\phi_I = - \iint_{S_I} \sigma_I(x', y') (1/r_I) (dx' dy') - \iint_{S_0} \sigma_0(x', y', z') (1/r_0) dS$$

$$r_0 = \sqrt{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]}$$

$$r_I = \sqrt{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2]}$$

Граничное условие выражается следующим образом:

$$\delta\phi_0/\delta n = 0, \quad \delta\phi_I/\delta n = 0 \text{ on } S_0$$

$$\zeta(x, y) = \frac{1}{2}g[U^2 - \phi_{0x}^2 - \phi_{0y}^2 - 2\phi_{0x}\phi_{Ix} - 2\phi_{0y}\phi_{Iy}]$$

Условие на линеаризованной свободной поверхности в методе дублированного корпуса удовлетворяется на S_I

$$\phi_{0I}^2 \phi_{III} + 2\phi_{0I} \phi_{0II} \phi_{II} + g\phi_{II} \phi_{Iz} = -\phi_{0I}^2 \phi_{0II} \text{ на } Z = 0$$

Давление вокруг корпуса судна;

$$p - p_0 = \frac{1}{2}\rho[U^2 - \phi_{0x}^2 - \phi_{0y}^2 - \phi_{0z}^2 - 2\phi_{0x}\phi_{Ix} - 2\phi_{0y}\phi_{Iy} - 2\phi_{0z}\phi_{Iz}]$$

Возвышение свободной поверхности;

$$\zeta(x, y) = \frac{1}{2}g[U^2 - \phi_{0x}^2 - \phi_{0y}^2 - 2\phi_{0x}\phi_{Ix} - 2\phi_{0y}\phi_{Iy}]$$

Волновое сопротивление;

$$F = \sum \{p(i) - p_0\} n_{xi} \Delta S_{oi}$$

Где; ΔS_{oi} обозначает площадь панели на поверхности корпуса, а n_{xi} а есть направляющие косинусы нормалей к панелям.

Были проведены модельные испытания и полученные результаты использовались для сравнения математических расчетов, а лучшая форма корпуса в отношении волнового сопротивления выбиралась на основании модельных испытаний. Задача оптимизации с ограничениями была трансформирована в оптимизационную задачу без ограничений методом внутренних точек SUMT нелинейного программирования (NLP). Для минимизации волнового сопротивления и волновых профилей улучшенного корпуса использовался градиентный метод реализуемый программой Tescplot. Как уже отмечалось, метод источников Ранкина представляет собой метод расчета волнового сопротивления, использующий метод обтекания дублированной модели вместо метода однородного потока теории тонкого судна. Оптимальная математическая модель

была получена при принятии водоизмещения и ватерлинии в качестве базовых ограничений. Корпус с минимальным волновым сопротивлением был найден путем оптимизации носовой части корпуса методом NLP, причем в качестве оригинального корпуса принимался корпус серии 60. Градиентный метод программы Тесplot использовался для минимизации волнового сопротивления и волновых профилей улучшенного корпуса. Для расчетной скорости $F_n = 0.285$ посредством трех оптимальных проектных схем было получено три улучшенных корпуса. Анализ показал, что в первой схеме волновое сопротивление улучшенного корпуса было уменьшено на 24.8% во второй схеме- на 21.5% и в третьей схеме на 18.6% . Предполагалось, что в дальнейшем необходимо рассмотреть вязкостное сопротивление. Метод источников Ранкина оказался надежным инструментом анализа улучшенного корпуса.

В процедуре оптимизации корпуса, мультипликативная функция модификации $w(x, y)$ исходной поверхности корпуса $f_o(x, y)$ и улучшенная поверхность корпуса $y(x, z)$ связаны следующим образом;

$$y(x, z) = f_o(x, y) w(x, y)$$

$$x(x, y) = 1 - \sum \sum A_{mn} \sin \{ \pi [(x - x_o) / (x_{max} - x_o)]^{m+2} \} \cdot \sin \{ \pi [(z_o - z) / (z_o + T)]^{n+2} \};$$

$$m, n = 1, 2, 3, \dots; \quad 0 \leq x \leq L/2, \quad w(x, z) > 0, \quad x > x_o, \quad z < z_o$$

При $m, n = 1, 2, 3$ имеется 9 переменных A_{mn}

Обсуждаемый расчет проводится в несколько итераций вплоть до достижения сходимости результата, когда корпус становится оптимальным и имеет минимальное волновое сопротивление. Процесс оптимизации был выполнен для определенных проектных параметров и условий по волновому сопротивлению, объемному водоизмещению и отношениям смоченной поверхностей оптимального и исходного корпусов. При этом волновое сопротивление существенно снизилось, хотя подводная часть корпуса и площадь ватерлинии несколько увеличились. В так называемой 2.5D/2D+t теории [28], используемой для расчета подъема волновой поверхности, решение двумерного уравнения Лапласа определяется с пространственными динамическими и кинематическими условиями на свободной поверхности. В рамках данной теории течение рассматривается в каждом поперечном сечении корпуса и подвержено влиянию течения вниз по потоку от носа судна. Потенциал течения для каждого поперечного сечения находится из решения двумерной задачи и удовлетворяет двумерному уравнению Лапласа. Изменения течения в направлении x относительно изменений потока в поперечной плоскости считаются пренебрежимо малыми. Двумерное уравнение Лапласа, динамические и кинематические условия на свободной поверхности записываются в виде;

$$(d^2 \phi / dy^2) + (d^2 \phi / dz^2) = 0; \quad d\phi / dx = -g\zeta / U \quad \text{на } z = 0;$$

$$d\zeta / dx = (1/U) d\phi / dz \quad \text{на } z = 0$$

Поэтому в теории 2D+t поток в поперечной плоскости зависит от времени, и линеаризованные динамические и кинематические условия на свободной поверхности при обретают вид ;

$$d\phi/dt + g\zeta = 0 \text{ на } z = 0 \text{ и } d\zeta/dt = d\phi/dz \text{ на } z = 0$$

Интегрирование выражений для I и J , фигурирующих в интеграле Мичеля - Виглея и связанных с амплитудной волновой функцией, выполнялось вначале в плоскости y - z (поперечная плоскость), а затем в направлении $\pm x$ с началом координат, принятом на миделе. Процедуры интегрирования могут быть адаптированы к теории 2.5D/2D+t преобразованием координаты $x = Ut + x_0$ к произвольной заданной поперечной плоскости, причем в данном случае (отсчет идет от миделя) $x_0 = 0$ как показано на Рис. В.6.

$$R_w = (4\rho g^2/\pi U^2) \int (I^2 + J^2) \sec^3 \theta d\theta; 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

$$J = bd \iint \eta_x \exp(-d \sec^2 \theta g \zeta / U^2) \sin(\ell g \zeta \sec \theta / U^2) d\zeta d\zeta; -1 \leq x \leq \zeta, 0 \leq \zeta \leq l$$

$$I = bd \iint \eta_x \exp(-d \sec^2 \theta g \zeta / U^2) \cos(\ell g \zeta \sec \theta / U^2) d\zeta d\zeta; -1 \leq x \leq \zeta, 0 \leq \zeta \leq l$$

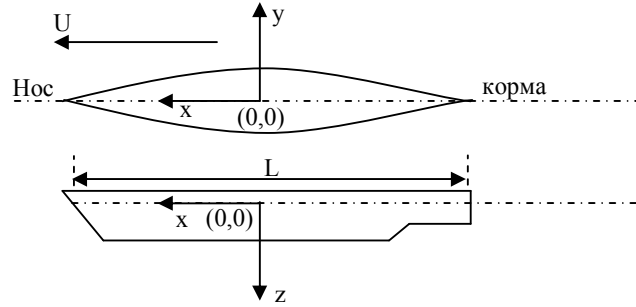


Рис. В.6. Система координат x - y - z

В теории узкого тела суда могут считаться гидродинамически узкими [30] если ширина судна (B) относительно его длины (L). Теория узкого тела весьма распространена в гидродинамике и сегодня нередко используется при рассмотрении судов и океанских конструкций, где можно ввести аппроксимации, основанные на узкости тела. Выкладки по получению формул для вычисления волнового сопротивления, вертикальной силы, продольного момента и посадки узкого судна можно найти в [30] и [9].

Для закритического случая; $Fn_h > 1$; $-L/2 < x < L/2$

$$\text{Волновое сопротивление, } R_w = \rho U^2 / [2h(Fn_h^2 - 1)]^{1/2} \int [S'(x)]^2 dx$$

$$\text{Вертикальная сила, } F_y = \rho U^2 / [2h(Fn_h^2 - 1)]^{1/2} \int b(x) S'(x) dx \approx \rho U^2 \int b(x) S'(x) dx$$

Продольный момент;

$$M_z = \rho U^2 / [2h(Fn_h^2 - 1)]^{1/2} \int x b(x) S'(x) dx \approx \rho U^2 \int b(x) S'(x) x dx$$

Для докритического случая; $Fn_h < 1$; $-L/2 \leq x \leq L/2$

$$\text{Вертикальная сила, } F_y = \rho U^2 / [2\pi h(1 - Fn_h^2)]^{1/2} \int b'(x) \int S'(\xi) \ln|\xi - x| d\xi dx$$

$$\text{Продольный момент, } M_z = \rho U^2 / [2\pi h(1 - Fn_h^2)]^{1/2} \int x b'(x) \int S'(\xi) \ln|\xi - x| d\xi dx$$

С учетом Рис. В.7, продольный (дифференцирующий) может также выражаться следующим образом:

$$M_z = \Delta GZ$$

$$GZ = \Delta G M_L \theta$$

так как для малых углов $\sin\theta$ and $\tan\theta \approx \theta$

Поэтому, с учетом геометрии, приведенной на Рис. В.7 полный дифферент судна равен $t_l = L_{BP}\theta$

Посадка судна, движущегося в воде, может быть рассчитана на основе баланса сил (гидродинамических, веса и плавучести), действующих в вертикальной плоскости [30]. Когда судно плавает без хода на тихой воде его вес и сила плавучести уравниваются друг друга и распределение площадей подводной части поперечных сечений равно $S_o(x)$. Когда посадка судна изменяется на величину s , в продольном распределении площадей подводной части поперечных сечений возникает некоторое приращение $S_s(x)$. Для судна с вертикальными бортами $S_s(x) = b(x) \cdot s$, так что распределение площади погруженных сечений судна становится равным ;

$$S(x) = S_o(x) + S_s(x) = S_o(x) + b(x) \cdot s$$

Поскольку на докритических скоростях посадка весьма мала баланс вертикальных сил с ее учетом равен;

$$Fn_h^2 / [2\pi(1 - Fn_h^2)^{1/2}] \int b'(x) dx \left[\int S_o'(\xi) \ln|\xi - x| d\xi + \int b'(\xi) \ln|\xi - x| d\xi \right] + A_w s = 0;$$

$$-L/2 \leq x \leq L/2, -$$

$$L/2 \leq \xi \leq L/2$$

Из этого уравнения можно определить посадку s ;

$$s = - \{ Fn_h^2 / [2\pi(1 - Fn_h^2)^{1/2}] \int b'(x) dx \left[\int S_o'(\xi) \ln|\xi - x| d\xi + \int b'(\xi) \ln|\xi - x| d\xi \right] \} / A_w;$$

$$-L/2 \leq x \leq L/2, -L/2 \leq \xi \leq L/2$$

В соответствии с концепцией источников и стоков, проиллюстрированной на приведенном выше Рис. В.8, при движении судна вперед его передняя часть от носа до миделя как бы «расталкивает» воду, то есть работает как источник. Соответственно, его задняя часть от миделя до кормы как бы «втягивает» воду, то есть действует как сток. Условие на свободной поверхности [30] в линеаризованной форме принимает вид;

$$U^2 (\partial^2 G / \partial x^2) + g(\partial G / \partial z) = 0 \text{ on } z = 0,$$

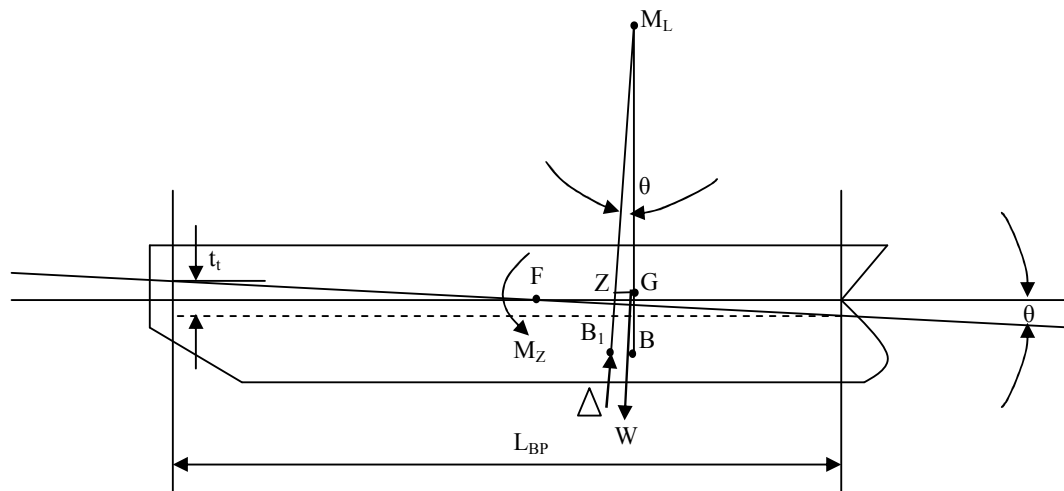


Рис. В.7. – Геометрия дифферента судна

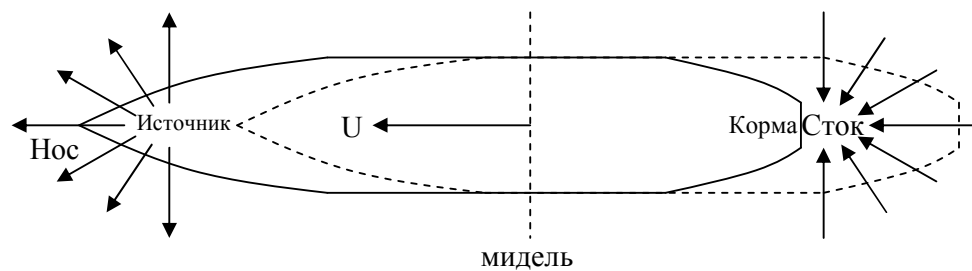


Рис. В.8. – Концепция источников и стоков при рассмотрении движения судна

Функция G представляет собой потенциал скорости источника или стока и называется функцией Грина. Полное выражение для потенциала G можно найти в [31] и записать в виде;

$$G \approx -ivQ/\pi \int \sec^2 \theta e^u d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$$

$$u = v[(z + \zeta) \sec^2 \theta + i|y - \eta| \sec^2 \theta \sin \theta - i|x - \zeta| \sec \theta]$$

$$Q > 1 \text{ источник, } Q_{BS} = US,$$

$$Q < 1 \text{ раковина, } Q_{SS} = -US$$

Если координаты источника и стока принять соответственно как;

$$\zeta = -0.5L, \eta = 0, \zeta = 0 \text{ и } \zeta = 0.5L, \eta = 0, \zeta = 0$$

Результирующее возвышение свободной поверхности равно;

$$\zeta(x, y) = -(U/g) \partial \phi(x, y, 0) / \partial x$$

Взяв действительную часть приближенного выражения для потенциала скорости можно вывести следующую формулу для возвышения волновой поверхности ;

$$\zeta_{BS} = (U^2 S v^2 / g \pi) \int \sec^3 \theta \exp(i v / \cos^2 \theta [y] \sin \theta - |x + L/2| \cos \theta) d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$$

Где ;

$$v = g/U^2$$

$$A(\theta) = (U^2 S v^2 / g \pi) \sec^3 \theta$$

Следующие выкладки, относящиеся к линейной и нелинейной теории волн в жидкости конечной и бесконечной глубины, приводятся по Ньюмену [9]. Скорость жидкости V при волнообразовании есть градиент потенциала скорости ϕ и влияние свободной поверхности учитывается выполнением на ней соответствующих граничных условий. При этом нормальные составляющие скорости жидкости и точек свободной границы равны, а давление на свободной поверхности равно атмосферному. Жидкость предполагается идеальной, а поверхностное натяжение пренебрежимо малым. При этом используется декартова система координат (x, y, z) , невозмущенное положение свободной поверхности соответствует $y = 0$, а ось y направлена вверх. Вертикальное смещение границы равно $y = \eta(x, z, t)$.

Кинематическое условие на свободной поверхности означает, что полная производная $y - \eta$ равна нулю, то есть $D/Dt (y - \eta) = 0$.

$$D/Dt (y - \eta) = (\partial \phi / \partial y) - (\partial \eta / \partial t) - (\partial \phi / \partial x)(\partial \eta / \partial x) - (\partial \phi / \partial z)(\partial \eta / \partial z) = 0$$

Если η мало, то и производные $\partial \eta / \partial x$ и $\partial \eta / \partial z$ тоже малы. Поэтому последними двумя слагаемыми второго порядка можно пренебречь и , в итоге, линеаризация приводит к выражению

$$\partial \phi / \partial y = \partial \eta / \partial t;$$

Которое означает, что скорости жидкой частицы, находящейся на поверхности и соответствующей точки границы равны. Динамическое граничное условие получается на основе интеграла Лагранжа. Атмосферное давление во всех точках поверхности одинаково так, что полное динамическое условие имеет вид;

$$-(1/\rho)(p - p_a) = \partial \phi / \partial t + 1/2 \nabla \phi \cdot \nabla \phi + g y = 0$$

Нелинейное выражение для возвышения свободной поверхности приобретает вид;

$$\eta = -(1/g)(\partial \phi / \partial t + 1/2 \nabla \phi \cdot \nabla \phi)$$

Пренебрегая членами второго порядка малости, найдем линеаризованную форму выражения для возвышения свободной поверхности в виде;

$$\eta = -(1/g) \partial \phi / \partial t$$

Дифференцируя по t , получим комбинированное граничное условие для потенциала скорости;

$$\partial^2 \phi / \partial t^2 + g \partial \phi / \partial y = 0, \text{ на } y=0$$

Общее выражение ординат свободной поверхности в случае прогрессивных волн таково;

$$\eta(x, t) = A \cos(kx - \omega t + \varepsilon)$$

В двумерном случае соответствующий потенциал скоростей можно записать так;

$$\phi(x, y, t) = \operatorname{Re} [Y(y)e^{-ikx+i\omega t}]$$

где;

$$Y = Ce^{ky} + De^{-ky}$$

Для случая жидкости бесконечной глубины в предыдущем выражении $\infty < y < 0$ и $D = 0$, так что

$$Y = Ce^{ky}$$

И потенциал скорости равен,

$$\phi = \operatorname{Re} [Ce^{-ikx+i\omega t}], \text{ и } C = i g A / \omega$$

Волновой потенциал скорости первого порядка может быть переписан как ;

$$\phi = (gA/\omega)e^{ky} \sin(kx - \omega t); \quad k = \omega^2/g$$

Дифференцируя этот потенциал скорости по x и y , нетрудно найти горизонтальную и вертикальную компоненты скорости жидкости ;

$$u = \partial \phi / \partial x = \omega A e^{ky} \cos(kx - \omega t)$$

$$v = \partial \phi / \partial y = \omega A e^{ky} \sin(kx - \omega t)$$

$$V_p = \omega/k = g/\omega = (g/k)^{1/2} = (g\lambda/2\pi)^{1/2}$$

Поскольку для жидкости конечной глубины h с твердым дном граничное условие непротекания имеет вид $\partial \phi / \partial y = 0$, $y = -h$, то можно удовлетворить это условие заменяя две независимых составляющих этого решения $e^{\pm ky}$ линейной комбинацией гиперболического синуса и косинуса и в этом случае для жидкости конечной глубины,

$$Y(y) = C[\cosh k(y + h)/\cosh kh]$$

Следовательно, подходящее выражение для потенциала скорости имеет вид;

$$\phi = (gA/w) [\cosh k(y + h)/\cosh kh] \sin(kx - wt)$$

Где для удовлетворения условия на свободной поверхности нужно принять $k \tanh kh = w^2/g$. Составляющие скорости жидкости можно получить дифференцированием этого потенциала по x и по y , что дает;

$$u = \partial\phi/\partial x = (gAk/w) [\cosh k(y + h)/\cosh kh] \cos(kx - wt)$$

$$v = \partial\phi/\partial y = (gAk/w) [\sinh k(y + h)/\cosh kh] \sin(kx - wt)$$

$$V_p = w/k = [(g/k) \tanh kh]^{1/2}$$

Для глубокой воды $kh \gg 1$, а для мелкой воды $kh \ll 1$

Нелинейное условие на свободной поверхности имеет вид ;

$$(\partial/\partial t + \nabla\phi \cdot \nabla) (\partial\phi/\partial t + 1/2 \nabla\phi \cdot \nabla\phi + gy = 0$$

Вычисляя производные, получим;

$$\partial^2\phi/\partial t^2 + g\partial\phi/\partial y + 2\nabla\phi \cdot \nabla\partial\phi/\partial t + 1/2 \nabla\phi \cdot \nabla(\nabla\phi \cdot \nabla\phi) = 0$$

Это выражение точное и явное, и применяется на неизвестной поверхности $y = \eta$. Разлагая по Тейлору вышеизложенное условие на свободной поверхности в окрестности невозмущенного положения этой поверхности и записывая в виде аналогичного разложения потенциал скорости имеем;

$$\phi(x, \eta, z, t) = \phi(x, 0, z, t) + \eta(\partial\phi/\partial y)_{y=0} + 1/2(\partial^2\phi/\partial y^2)_{y=0} + \dots\dots$$

И следующую систему граничных условий, записанную вплоть до третьего порядка;

- 1) $\partial^2\phi/\partial t^2 + g\partial\phi/\partial y = 0 + O(\phi^2)$; первый порядок
- 2) $\partial^2\phi/\partial t^2 + g\partial\phi/\partial y + 2\nabla\phi \cdot \nabla\partial\phi/\partial t - (1/g) \partial\phi/\partial t \partial/\partial y (\partial^2\phi/\partial t^2 + g\partial\phi/\partial y) = 0 + O(\phi^3)$; второй порядок
- 3) $\partial^2\phi/\partial t^2 + g\partial\phi/\partial y + 2\nabla\phi \cdot \nabla\partial\phi/\partial t + 1/2 \nabla\phi \cdot \nabla(\nabla\phi \cdot \nabla\phi) - (1/g) \partial\phi/\partial t \partial/\partial y (\partial^2\phi/\partial t^2 + g\partial\phi/\partial y) + 2\nabla\phi \cdot \nabla\partial\phi/\partial t - (1/g)((-1/g) \partial\phi/\partial t \partial^2\phi/\partial y \partial t + 1/2 \nabla\phi \cdot \nabla\phi) \partial/\partial y (\partial^2\phi/\partial t^2 + g\partial\phi/\partial y) + (1/2g^2) (\partial\phi/\partial t)^2 \partial^2\phi/\partial t^2 \partial^2/\partial y^2 (\partial^2\phi/\partial t^2 + g\partial\phi/\partial y) = 0 + O(\phi^4)$; третий порядок

Подставляя двумерный потенциал первого порядка в граничное условие второго порядка 2), приходим к выводу, что потенциал скорости первого порядка является решением краевой задачи второго порядка, то есть;

$$\phi = (gA/w)e^{ky} \sin(kx - wt) + O(A^3)$$

С учетом поправки второго порядка возвышение свободной поверхности описывается выражением;

$$\begin{aligned}
\eta &= - (1/g)(\partial\phi/\partial t + 1/2 \nabla\phi \cdot \nabla\phi)_{y=\eta} \\
&= - (1/g)(\partial\phi/\partial t + 1/2 \nabla\phi \cdot \nabla\phi)_{y=0} \\
&\quad + \eta \partial/\partial y \{ -(1/g)(\partial\phi/\partial t + 1/2 \nabla\phi \cdot \nabla\phi) \}_{y=0} + \dots\dots\dots \\
&= - (1/g)(\partial\phi/\partial t + 1/2 \nabla\phi \cdot \nabla\phi - (1/g) \partial\phi/\partial t \partial^2\phi/\partial y \partial t)_{y=0} + O(\phi^3)
\end{aligned}$$

Вычисление производных потенциала первого порядка приводит к следующему выражению для возвышения свободной поверхности с учетом эффектов второго порядка;

$$\eta = A \cos(kx - wt) - 1/2 k A^2 - k A^2 \cos^2(kx - wt)$$

Условие третьего порядка на свободной границе 3) можно упростить, поскольку при подстановке нелинейных слагаемых остаются только следующие члены ;

$$\partial^2\phi/\partial t^2 + g\partial\phi/\partial y + 1/2 \nabla\phi \cdot \nabla(\nabla\phi \cdot \nabla\phi) = 0 + O(\phi^4)$$

Решение первого порядка для потенциала скорости удовлетворяет граничному условию третьего порядка, однако дисперсионное соотношение должно быть подправлено следующим образом;

$$w^2 = gk(1 + k^2 A^2) + O(k^3 A^3),$$

Соответствующая подправленная фазовая скорость равна;

$$V_p = w/k = [gk(1 + k^2 A^2)]^{1/2} + O(k^3 A^3) = (gk)^{1/2} (1 + 1/2 k^2 A^2) + O(k^3 A^3)$$

Когда судно начинает двигаться в воде с постоянной скоростью U и движение устанавливается, волны вниз по течению движутся с фазовой скоростью $V_p = U$. Длина волны и волновое число для глубокой воды равны $\lambda = 2\pi U^2/g$ и $k = g/U^2$ соответственно. При движении судна создаются волны, несущие энергию, то есть движущееся судно совершает работу и испытывает волновое сопротивление. Теперь, свяжем волновое сопротивление с волновой амплитудой A . Полная энергия равна плотности энергии ($1/2 \rho g A^2$), умноженной на скорость (U) и по закону сохранения энергии равна силе сопротивления, умноженной на скорость (DU) плюс плотности энергии, умноженной на фазовую скорость ($V_p = 1/2 U$). Имеем;

$$1/2 \rho g A^2 = DU + (1/2 \rho g A^2)(1/2 U) = DU + 1/4 \rho g A^2 U$$

Откуда, сила сопротивления D (волновое сопротивление);

$$D = 1/4 \rho g A^2 U$$

Для единичного малого возмущения, волновое возвышение будет равно;

$$\eta = a \cos(kx + \varepsilon), \text{ где } a \text{ волновая амплитуда, } k = g/U^2$$

а для двух возмущений;

$$\eta = a \cos(kx + \varepsilon) - a \cos(kx + \varepsilon - kl) = \operatorname{Re}\{ae^{i(kx + \varepsilon)}(1 - e^{ikl})\}$$

Полная волновая амплитуда от двух возмущений равна;

$$A = a|1 - e^{ikl}| = 2a|\sin(1/2kl)|$$

$$D = \rho g a^2 |\sin(1/2kl)|$$

По Ньюмену [9] распределение волн в пространственной задаче дается двойным интегралом, записанным в системе координат движущейся вместе с судном в направлении положительных x со скоростью U при замене x на $x + Ut$;

$$\eta(x, z, t) = \operatorname{Re} \int dw \int A(w, \theta) \exp[-ik(x \cos \theta + z \sin \theta) + i(w - kU \cos \theta)t] d\theta;$$

$$0 \leq w \leq \infty, 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

где;

$$kU \cos \theta - w = 0, V_p = w/k = U \cos \theta$$

Описанная выше трехмерная система волн может быть задана единым интегралом, если исключить одно из переменных посредством соотношения $kU \cos \theta - w = 0$;

$$\eta(x, z) = \operatorname{Re} \int A(\theta) \exp[-ik(\theta)(x \cos \theta + z \sin \theta)] d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$$

для глубокой воды;

$$k(\theta) = (g/U^2) \cos^2 \theta$$

Приводимое здесь обсуждение волнового сопротивления на глубокой и мелкой воде базируется на двух исследованиях, а именно Граффа и др. (1964) и Хофмана (2006) [31]. Число Фруда по глубине для случая жидкости конечной глубины h равно $F_h = U/(gh)^{1/2}$ и является важным параметром при рассмотрении судовых волн и волнового сопротивления на мелководье. Первое исследование на эту тему Граффа и др. (1964) другую форму представления результатов в виде влияния глубины воды на отношение остаточного сопротивления к водоизмещению (R_R/Δ) в функции от числа Фруда F_n и отношения h/L для модели судна с призматическим коэффициентом 0.64 and $B/T = 3$, что показано на Рис. В.15 Приложения. Результаты анализа Хофмана были представлены в виде отношения волнового сопротивления судна на мелкой воде к волновому сопротивлению на глубокой воде (R_h/R_∞) при различных значениях F_L и F_h в зависимости от h/L для корпуса Виглея в рамках линейной теории тонкого судна, что представлено на Рис. В.16 (а) и В.16 (б) Приложения. Обычно, в критической области чисел Фруда это отношение равно 1 и более.

Сретенский (1977), основываясь на обобщенном интеграле Мичеля ввел следующую приближенную формулу для отношения $R_h/g\Delta$ тонкого

однокорпусного судна, движущегося со скоростью v в невязкой жидкости произвольной глубины h :

$$R_h' = R_h/g\Delta = (2F_h\hat{h}/\pi\delta BT) \int [P^2(\gamma) + Q^2(\gamma)]\gamma / [\cosh^2\gamma\hat{h}\sqrt{(F_h^2\gamma^2\hat{h}^2 - \gamma\hat{h}\tanh\gamma\hat{h})}]d\gamma;$$

$$\gamma_o = 0 \text{ для } F_h > 1$$

$$\gamma_o \leq \gamma \leq \infty$$

$$\tanh \gamma_o / \gamma_o = F_h^2 \text{ для } F_h < 1$$

$$P(\gamma) = \iint_S (\partial f / \partial x) \cos\{(x/\hat{h}F_h)\sqrt{(F_h^2\gamma^2\hat{h}^2 - \gamma\hat{h}\tanh\gamma\hat{h})}\} \cdot \cosh\{\gamma(z + \hat{h})\} dx dz$$

$$P(\gamma) = \iint_S (\partial f / \partial x) \sin\{(x/\hat{h}F_h)\sqrt{(F_h^2\gamma^2\hat{h}^2 - \gamma\hat{h}\tanh\gamma\hat{h})}\} \cdot \cosh\{\gamma(z + \hat{h})\} dx dz$$

Милан Хофман (2006) [31] в рамках линейной теории выполнил расчеты волнового сопротивления однокорпусного судна (модели VBD; серия 220 Тейлора и 311 с двумя винтами), опираясь на приведенную выше формулу Сретенского для различных отношений L/h и провел сравнение с экспериментальными данными. Расчеты были проведены с использованием компьютерной программы ShallowRes®. Некоторые из расчетных и экспериментальных результатов для моделей Тейлора VBD 220 показаны на Рис. В.17 (а) - В.17 (б) Приложения.

Ляховицкий (1976, 2007) [34], [35] аппроксимировал формулу для определения волнового сопротивления тримарана следующим образом:

$$R_h' = R_h/g\Delta = (2F_h\hat{h}/3\pi\delta BT) \int \{\gamma / [\cosh^2\gamma\hat{h}\sqrt{(F_h^2\gamma^2\hat{h}^2 - \gamma\hat{h}\tanh\gamma\hat{h})}]\} \cdot$$

$$\{ (P_C^2 + Q_C^2) + 2(P_S^2 + Q_S^2) \{ 1 + \cos[(2b/F_h\hat{h})\sqrt{(F_h^2\gamma^2\hat{h}^2 - \gamma\hat{h}\tanh\gamma\hat{h})}] \} + 4(P_C P_S + Q_C Q_S) \cdot$$

$$\cos[(b/F_h\hat{h})\sqrt{(F_h^2\gamma^2\hat{h}^2 - \gamma\hat{h}\tanh\gamma\hat{h})}] \} d\gamma; \gamma_o \leq \gamma \leq \infty$$

$$P_{C,S} = \iint_{S_{C,S}} (\partial f_s / \partial x) \cos\{(b/\hat{h}F_h)\sqrt{(F_h^2\gamma^2\hat{h}^2 - \gamma\hat{h}\tanh\gamma\hat{h})}\} \cdot \cosh\{\gamma(z + \hat{h})\} dx dz$$

$$Q_{C,S} = \iint_{S_{C,S}} (\partial f_s / \partial x) \sin\{(b/\hat{h}F_h)\sqrt{(F_h^2\gamma^2\hat{h}^2 - \gamma\hat{h}\tanh\gamma\hat{h})}\} \cdot \cosh\{\gamma(z + \hat{h})\} dx dz$$

Настя Дегуили, Андреа Вернер и Здравко Дилинер (2003) [38] изучили сопротивление тримарана полученное на основе экспериментальных замеров волновых профилей и проанализировали результаты посредством Фурье преобразования Ландвебера (LWT), метода матричных элементов (MEM) и метода эквивалентных особенностей (MES). В указанных работах использовались следующие уравнения:

Высота системы свободных волн;

$$H(x,y) = \sum \varepsilon_m (A_m \cos k_o \ell_m x + B_m \sin k_o \ell_m x) \cos k_o t_m y; m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Амплитудный спектр свободных волн;

$$A(t_m) + iB(t_m) \equiv A_m + iB_m = (8\pi/bc)[(1+(1+4t_m^2))^{0.5}/(1+4t_m^2)^{0.5}]J((-1)^m t_m \ell_m)$$

Где;

$J((-1)^m t_m \ell_m)$ есть функция Кочина;

$$J((-1)^m t_m \ell_m) = (1/4\pi) \int_{(D)} \sigma(M') \exp(k_o \ell_m^2 z' + k_o [\ell_m x' + (-1)^m t_m y']) dD(M')$$

Высота волн;

$$H(x,y) = (2/bc) \sum \varepsilon_m [(1+(1+4t_m^2))^{0.5}/(1+4t_m^2)^{0.5}] \int_{(D)} \sigma(M') \exp(k_o \ell_m^2 z' \cdot \cos k_o \ell_m (x-x') \cos k_o t_m (y-y')) dD(M'); m = 0, 1, 2, 3 \dots \infty$$

Коэффициент волнового сопротивления, определенный по волновым профилям;

$$C_{WP} = R_{WP}/\frac{1}{2}\rho S c^2 = (k_o b/2S) \sum \varepsilon_m [(1+(1+4t_m^2))^{0.5}/(1+4t_m^2)^{0.5}] (A_m^2 + B_m^2)$$

Из всех авторов теорий волнового сопротивления известных сегодня, Мичель безусловно заслуживает наибольшего внимания как первый разработчик теории тонкого судна. Представляется, что большинство формул для определения волнового сопротивления, полученных в рамках линейной теории, являются вариантами интеграла Мичеля.

В.3. Формулировка направления исследования. Формулировка темы и направления данного диссертационного исследования представлены ниже, а решения соответствующих задач и выводы даны в соответствующих главах диссертации.

В.3.1. Цель диссертационной работы. Целью диссертации было вычисление интегралов волнового сопротивления линейной теории тонкого судна полученных Мичелем, Виглеем и Таком-Лазаускасом для однокорпусных, двух корпусных и трехкорпусных судов посредством предложенного автором метода конечного корня, дающего возможность получить устойчивые и приемлемые по точности результаты.

В.3.2. Постановка задачи. Исследованию задачи волнового сопротивления судна, как одной из наиболее важных составляющих полного сопротивления, уделялось и уделяется большое внимание. При этом усилия направлены на получение более точных и обоснованных решений, что требует постоянного обращения к классическим методам, разработанных в прошлом, для усовершенствования новых современных подходов.

На основании выполненного обзора существующих в этой области исследований автор решил взять в качестве основы для своей диссертационной работы, посвященной вычислению волнового сопротивления удлиненных судов различной конфигурации, фундаментальную работу Мичеля (1898) и ее последующие развития Виглеем (1926) и Ньюменом (1977) для однокорпусных судов и Така-Лазаускаса (1998) для многокорпусных судов. Нет сомнения в том, что разработанные с помощью линейной теории тонкого судна подходы к определению волнового сопротивления однокорпусных и многокорпусных судов представляют собой эффективные инструменты оценки характеристик ходкости судна. Однако, при их реализации возникают трудности, связанные с

высокочастотными осцилляциями подынтегральных функций, а также присутствием в интегралах волнового сопротивления выражений, включающих тригонометрические функции типа $\sec\theta$, $\sec^2\theta$ and $\sec^3\theta$, что при использовании пределов $\theta = -\pi/2$ и $\theta = \pi/2$, фигурирующих в классических формулах, обуславливает расходимость этих интегралов.

Отметим, что из обзора имеющейся литературы следует, что вычисление оригинального интеграла Мичеля для частного случая судна симметричного как относительно миделя так и относительно диаметральной плоскости было произведено в пионерской работе Виглея (1926) методом асимптотического разложения. При этом отмечалось, что остаток интеграла в окрестности бесконечных значений переменной интегрирования λ пренебрежимо мал. Более тщательное рассмотрение этого интеграла показывает, что на самом деле интеграл оказывается расходящимся. Возможно, обсуждаемая выше некорректность и стала причиной погрешностей, возникающих при расчете волнового сопротивления на основе этого подхода.

В.3.3. Цель исследования. Основная цель настоящего диссертационного исследования состоит в применении предложенного автором метода конечного корня вычисления интегралов волнового сопротивления Мичеля-Виглея и Така-Лазаускаса. Результаты теоретического анализа с применением метода конечного корня сопоставлены как с экспериментальными данными, так и с надежными расчетными данными, полученными в работах различных авторов.

В.3.4. Предмет исследований. Предметом исследований является проблема определения сопротивления судна, связанного с генерируемыми при его движении в воде волнами. Волновое сопротивление является важнейшим компонентом общего сопротивления, знание которого необходимо для выбора энергетической установки. Волновое сопротивление может быть определено как экспериментально с привлечением метода форм-фактора, так посредством измерения волнового профиля в следе судна. Графическая иллюстрация метода форм-фактора определения сопротивления судна и его составляющих приведена на Рис. В.2.

В.3.5. Методология исследований. Методология исследований подробно проиллюстрирована диаграммой, приведенной на Рис. В.26. Приложение 3 и включает:

- 1) Проведение обзора литературы, посвященной определению волнового сопротивления с акцентом на различные теоретические исследования как собственно волнового сопротивления R_w , так и различных составляющих полного сопротивления;
- 2) Обсуждение предшествующих и современных методов теоретического и экспериментального определения волнового сопротивления;
- 3) Идентификация и выбор теоретического подхода к определению волнового сопротивления в качестве основного инструмента настоящего исследования;
- 4) Подробный анализ подходов и методов решения поставленных задач, разработка соответствующих алгоритмов и математических выражений, полученных из применяемой теории;
- 5) Пересмотр на предмет усовершенствования основных математических выражений, применяющихся для определения волнового сопротивления

- 6) Разработка численного метода для вычисления волнового сопротивления по полученным формулам;
- 7) Получить и проанализировать экспериментальные результаты по полному сопротивлению R_T моделей однокорпусных и многокорпусных судов (катамаранов и тримаранов), имеющиеся в банках данных научно-исследовательских институтов и центров;
- 8) В тех случаях, когда экспериментальные данные модельных экспериментов отсутствуют, спроектировать и изготовить новые модели судов и провести испытания с целью определения сопротивления в подходящем диапазоне чисел Фруда и для различных конфигураций многокорпусных судов в направлении данного исследования;
- 9) Выполнить анализ экспериментов и найти волновое сопротивление судна R_w методом форм-фактора на основе коэффициента волнового сопротивления соответствующих моделей;
- 10) Выполнить теоретический анализ и соответствующие вычисления предложенным автором данного исследования методом конечного корня;
- 11) Верифицировать и апробировать данные по волновому сопротивлению, полученные в настоящем теоретическом исследовании, посредством их сравнения с экспериментальными данными, а также с другими надежными теоретическими и расчетными данными;
- 12) Оценить эффективность теоретических методов решения поставленной Проблемы;
- 13) Продемонстрировать внедрение вычислительной методологии, примененной в данной работе при проведении экспериментального и теоретического анализа;
- 14) Провести параметрический анализ волнового сопротивления для различных типов судов и конфигураций корпуса с использованием метода конечного корня при варьировании основных размеров судов.

В.3.6. Достоверность результатов. Соответствующие экспериментальные и расчетные данные, использованные для апробации настоящего исследования были получены из следующих источников:

- 1) В исследованиях 1 и 2 по однокорпусным судам– экспериментальные данные по Кораблю Прибрежной Зоны (Littoral Combatant Ship - LCS) получены благодаря Королевскому Военно-морскому Флоту Малайзии, Боустедскому судостроительному заводу (Малайзия) и Центру исследований в области судостроения HSVA, Гамбург, Германия, причем эксперименты в HSVA были проведены в октябре 1999 года по контракту с личным участием автора этой работы;
- 2) В исследованиях 3, 4, 5 и 6 однокорпусного судна- экспериментальные данные по модели судна с корпусом Виглея были получены из банка данных

Малазийского технологического университета (Universiti Teknologi Malaysia -UTM), где эксперименты проводились в опытовом бассейне Морского технологического центра UTM в мае 2001;

- 3) В исследовании 7 однокорпусного судна– экспериментальные и расчетные данные по волновому сопротивлению были заимствованы из следующих опубликованных статей: (i) Sanseon Ju, Study of Total and Viscous Resistance for the Wigley Parabolic Ship Form, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, Iowa 52242, April 1983. (ii) Campana E., Lalli F., Bulgarelli U. A numerical method for nonlinear free surface conditions in the wave resistance problem //Arch. Mech. 1989. V. 41. № 2-3. P. 439-447. (iii) S.W. Song and R.E. Baddour, Computation of Nonlinear Ship Waves, International Journal for Numerical Methods in Fluids, November 1989;
- 4) Исследования 1 и 2 двухкорпусного судна– экспериментальные данные по катамарану с корпусами в конфигурации Виглея были получены из Малазийского технологического (UTM), где испытания были проведены в опытовом бассейне Морского технологического центра UTM в мае 2001 года;
- 5) Исследования 3 и 4 двухкорпусного судна– экспериментальные и расчетные данные были заимствованы из опубликованной статьи: M. Insel, A.F. Molland and J.F. Wellicome, Wave Resistance Prediction of a Catamaran by Linearised Theory, Proceedings of CAMO 94, 59-67M, 1994;
- 6) Исследования 1, 2, 3 и 4 трехкорпусных судов – экспериментальные данные по сопротивлению трехкорпусных судов с корпусами в конфигурации Виглея были получены из Малазийского технологического (UTM), где эксперименты были проведены лично автором данной работы в опытовом бассейне Морского технологического центра в октябре 2011 года;
- 7) Исследования 5 трехкорпусного судна (тримарана) – экспериментальные данные по тримарану с корпусами в конфигурации Виглея были заимствованы из опубликованной статьи: Nastia Degiuli. Andrea Werner, Zdravko Doliner, Experimental Determination of Wave Pattern Resistance of a Trimaran, XVII IMEKO World Congress, Dubrovnik, Croatia, June 22-27, 2003.

В.3.7. Представление работы к защите. К защите представляются следующие результаты исследований автора:

- 1) Теоретические результаты по определению волнового сопротивления судна полученные методом конечного корня для однокорпусного судна в сравнении с экспериментальными данными и теоретическими данными, полученными другими авторами посредством других методов:
 - Исследование 1 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Мичеля-Виглея, примененный к корпусу LCS) в сравнении с экспериментальными данными;

- Исследование 2 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Ньюмена, примененный к корпусу LCS) в сравнении с экспериментальными данными;
 - Исследование 3 – Метод конечного корня усовершенствованный метод Ньюмена, примененный к корпусу Виглея) в сравнении с экспериментальными данными;
 - Исследование 4 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Мичеля-Виглея, примененный к корпусу Виглея) в сравнении с экспериментальными данными;
 - Исследование 5 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Ньюмена, примененный к корпусу Виглея) в сравнении с экспериментальными данными и оригинальными расчетами Ньюмена посредством непосредственного вычисления интеграла I;
 - Исследование 6 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Ньюмена, примененный к корпусу Виглея) в сравнении с экспериментальными данными и расчетами Мичеля-Виглея посредством непосредственного вычисления интеграла J;
 - Исследование 7 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Мичеля-Виглея, примененный к корпусу Виглея) в сравнении с экспериментальными данными и расчетом методами вычислительной гидродинамики.
- 2) Теоретические расчетные данные для двухкорпусных судов, полученные методом конечного корня, в сравнении с экспериментальными данными и теоретическими данными, полученными другими авторами иными методами:
- Исследование 1 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Ньюмена, примененный к корпусу Виглея) в сравнении с экспериментальными данными для $2p/L = 0.3, 0.4, 0.5$;
 - Исследование 2 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Мичеля-Виглея в применении к корпусу Виглея) в сравнении с экспериментальными данными для $2p/L = 0.3, 0.4, 0.5$;
 - Исследование 3 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Ньюмена, примененный к корпусу NPL) в сравнении с экспериментальными данными и решением Инсела-Молланда-Велликома для $2p/L = 0.3$;
 - Исследование 4 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Мичеля-Виглея, примененный к корпусу NPL) в сравнении с экспериментальными данными и решением Инсела-Молланда-Велликома для $2p/L = 0.5$.
- 3) Теоретические данные по волновому сопротивлению трехкорпусного судна, полученные методом конечного корня в сравнении с экспериментальными данными и с теоретическими данными других авторов, полученными иными методами:

- Исследование 1 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Ньюмена) в сравнении с экспериментальными данными для $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м;
 - Исследование 2 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Ньюмена) в сравнении с экспериментальными данными для $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ м. Метод конечного корня (усовершенствованный метод Ньюмена) в сравнении с экспериментальными данными для $2p/L = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму;
 - Исследование 4 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Ньюмена) в сравнении с экспериментальными данными для $2p/L = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму;
 - Исследование 5 - Метод конечного корня (усовершенствованный метод Ньюмена) в сравнении с экспериментальными данными, полученными посредством измерения волновых профилей в следе для $2p/L = 0.4$, $LS = 0.61$ и в корму (LWT, MEM, MES).
- 4) Результаты параметрического исследования, выполненные автором для ряда случаев при варьировании параметров формы корпуса при осадке d и полуширине b с применением метода конечного корня.

В.3.8. Выполненные эксперименты. Непосредственные модельные эксперименты были выполнены в Малазийском технологическом университете (UTM). UTM является членом Международной конференции опытовых бассейнов (МКОБ) и его опытовый бассейн был открыт в 1996 с оборудованием, поставленным и установленным немецкой компанией Thyssen Rheinstall Technik. Размеры бассейна: длина 120 м, ширина 4 м, глубина 2.5 м, максимальная скорость тележки 5м/с, ускорение 1м/сек². Минимальный временной промежуток измерений равен 10 секунд. Система получения и обработки данных (DAAS) спроектированная и поставленная нидерландским исследовательским центром MARIN, способна считывать измеренную информацию с преобразователей, накапливать эту информацию и проводить анализ данных по сопротивлению судна. Система работает на персональном компьютере IBM-AT, обеспечивающем представление результатов и информации на экране в реальном времени. Эксперименты, проведенные в интересах данного исследования в UTM, выполнялись в соответствии со стандартными процедурами обработки результатов модельных испытаний, рекомендованными МКОБ. Другие экспериментальные данные, использованные для апробации результатов, полученных методом конечного корня, были заимствованы из публикаций, которые были отмечены в разделе, касающемся достоверности результатов данной работы.

В.3.9. Список публикаций и статей в трудах конференций по теме диссертации.

- 1) **М.С. Камил**, Применение метода конечного корня в линейной теории волнового сопротивления многокорпусных судов. однокорпусные суда, научный журнал «Морские интеллектуальные технологии» No. 3 (25) Т.1 2014, сс. 83-90;

- 2) **М.С. Камил**, Применение метода конечного корня в линейной теории волнового сопротивления многокорпусных судов. двухкорпусные суда, научный журнал «Морские интеллектуальные технологии» No. 3 (25) Т.1 2014, сс. 91-98;
- 3) **М.С. Камил**, Вычисление волнового сопротивления тримарана методом конечного корня, «Морской вестник» № 4 (52), декабрь 2014 ISSN 1812-3694, сс. 117-119;
- 4) **M.S. Kamil**, M.P.A Ghani, A.M.A Malik, K.V. Rozhdestvenskiy, A Definite Integral Solution of Ship Wave Resistance for Twin-Hull Ships, World Maritime Technology Conference 2012 (WMTC2012), 29 May – 1 June 2012, Saint Petersburg, Russia;
- 5) **M.S. Kamil**, M.P.A Ghani, A.M.A Malik, K.V. Rozhdestvenskiy, Revitalizing the Theoretical Approach of Predicting Ship Wave Resistance, Marine Science and Technology Conference 2011 (MARSTEC2011), 12-13 September 2011, Kuala Lumpur, Malaysia;
- 6) **M.S. Kamil**, M.P.A Ghani, A.M.A Malik, K.V. Rozhdestvenskiy, An Accurate Ship Wave Resistance of an Improved Michell-Wigley Equation, International Conference on Engineering Technology 2011, 6-8 December 2011, Kuala Lumpur, Malaysia, Serial Number 19. Marine Technology, ICET2011_25.

ГЛАВА 1

1. ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОДНОКОРПУСНЫХ СУДОВ

3.1 Предыстория. В соответствии с изложенным во Введении к диссертации, в качестве основного метода исследования, принятого в этой работе принята линейная теория Мичеля (1898), которая изучалась в целом ряде последующих работ. В качестве основного инструмента исследования проблем волнового сопротивления в рамках теории тонкого судна избрана формула Мичеля для вычисления волнового сопротивления, широко известная как интеграл Мичеля, усовершенствованная в дальнейшем Виглеем (1942), и называемая здесь формулой или интегралом Мичеля-Виглея, а также формула Ньюмена (1977), которую можно считать идентичной интегралу Мичеля. Мичель нашел потенциал скорости посредством интегральной теоремы Фурье, в то время как Ньюмен использовал метод источников и стоков с применением функции Грина. Интересно, что вывод Ньюмена приводит к некоторой форме интеграла Мичеля, которая, впрочем, несколько отличается в части использованных функций волновой амплитуды. Ниже приведены оригинальные выводы выражений для потенциалов скорости по Мичелю и Ньюмену.

3.2 Основное уравнение – выражение Мичеля-Виглея для определения волнового сопротивления. Вывод формулы Мичеля волнового сопротивления (Интеграл Мичеля) приведен ниже в соответствии с работой [3]. Линейная теория тонкого судна Мичеля развита в рамках следующих допущений и условий :

- 3.2.1 Наклон касательной плоскости в любой точке поверхности корпуса по отношению к диаметральной плоскости мал;
- 3.2.2 Потенциал скорости принят в виде $-U\phi + \phi$;
- 3.2.3 Наклон поверхности судна по отношению к плоскости $y = 0$ везде мал;
- 3.2.4 Движение жидкости предполагается стационарным;
- 3.2.5 Судно неподвижно, а жидкость движется в направлении его кормы с постоянной (если не принимать во внимание возмущенное движение) скоростью U ;
- 3.2.6 Потенциал возмущенных скоростей ϕ мал, и квадраты скоростей, соответствующих этому потенциалу малы по сравнению с их первыми степенями;
- 3.2.7 Влияние турбулентности и вязкости пренебрежимо малы;
- 3.2.8 Влиянием изменения посадки и дифферента на волнообразование можно пренебречь.

Диаметральная плоскость судна совпадает с плоскостью $y = 0$, а невозмущенное положение свободной поверхности – с плоскостью $z = 0$, ось Ox направлена в по

движению судна, а ось Oz – вертикально вниз. Начало системы координат расположено на миделе судна как показано на Рис. 1.1.

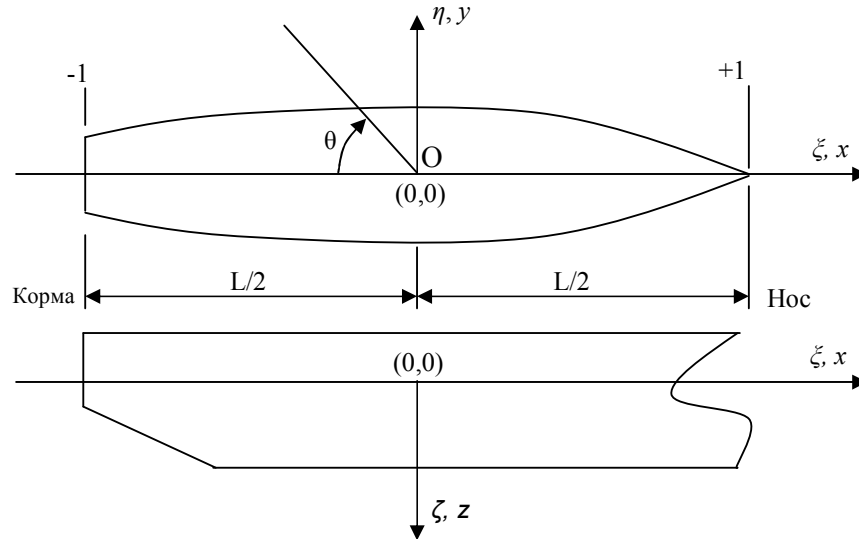


Рис. 1.1 – Координатная система для однокорпусного судна

Решение для ϕ ищется в области, занятой жидкостью $+y$ при заданных граничных условиях в плоскостях $z = 0$, $z = h$, $y = 0$. Пусть ζ есть возвышение свободной поверхности над ее невозмущенным положением в точке (x, y) , тогда;

$d\phi/dz = -Ud\zeta/d\xi$ представляет собой кинематическое условие на поверхности, а

$p/\rho + 1/2 q^2 - g\zeta = C$ есть условие по давлению, и

$$q^2 = (-U + d\phi/dx)^2 + (d\phi/dy)^2 + (d\phi/dz)^2 = U^2 - 2Ud\phi/dx$$

$$Ud\phi/dx + g\zeta = 0$$

$$d\phi/dz = (U^2/g)d^2\phi/dx^2$$

Судно обладает симметрией относительно диаметральной плоскости $y = 0$; так что $d\phi/dy = 0$ при $y = 0$, кроме вертикальной проекции судна где y представляет собой полуширину судна в точке (x, z) ,

$$d\phi/dy = -Ud\eta/dx = -Uf(x, z)$$

в плоскости $y = 0$, $d\phi/dz = 0$ а $z = h$ на дне акватории.

Примем решение в виде $a \cos n(z - h) \cos(mx + \alpha) \cos(py + \beta)$, где $m^2 + n^2 + p^2 = 0$, а m вещественное число, причем поверхность воды простирается от $x = -\infty$ до $x = +\infty$; n и p могут быть вещественными или мнимыми, но если p является

мнимым ($= ip'$), то последний множитель принимает вид $e^{-p'y}$. Это слагаемое удовлетворяет условию $d\phi/dz = 0$ при $z = h$ и удовлетворяет уравнению;

$$d\phi/dz = (U^2/g)d^2\phi/dx^2$$

Если $n \tanh h = -U^2 m^2/g$, это уравнение имеет бесконечное число действительных корней и один чисто мнимый корень, удовлетворяющий уравнению $n' \tanh n'h = U^2 m^2/g$, [$n = in'$].

Только чисто мнимый корень непосредственно связан с волновым сопротивлением. Что касается параметра p , он всегда принимает мнимое значение для действительных корней n , а также для случая мнимых корней, если $m > n'$. Условие $d\phi/dy = -U d\eta/dx = -U f(x, z)$ требует разложения заданной функции $f(x, z)$ в виде; $\sum \sum a_{mn} \cos n(z-h) \cos(mx + \alpha)$, где суммирование по всем значениям m принимает форму интегрирования. Предположим сначала, что функция периодична по x так что; $f(x + \ell, z) = f(x - \ell, z)$,

$$f(x, z) = \sum_r \sum_n \{A_{rn} \cos(\pi r x / \ell) + B_{rn} \sin(\pi r x / \ell)\} \cos n(z-h), \quad r \text{ положительный целый индекс.}$$

В соответствии с методом Фурье;

$$\int f(x, z) \cos(\pi r x / \ell) dx = \ell \sum_n A_{rn} \cos n(z-h); \quad -\ell \leq x \leq \ell$$

$$\int f(x, z) \sin(\pi r x / \ell) dx = \ell \sum_n B_{rn} \cos n(z-h); \quad -\ell \leq x \leq \ell$$

A_{0n} уменьшается вдвое. Поскольку все функции $\cos n(z-h)$ являются сопряженными, можно получить;

$$\begin{aligned} \iint f(x, z) \cos(\pi r x / \ell) \cos n(z-h) dx dz &= \ell A_{rn} \int \cos^2 n(z-h) dz; \quad -\ell \leq x \leq \ell, \quad 0 \leq z \leq h \\ &= \ell A_{rn} (1/4n) (2nh + \sin 2nh) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \iint f(x, z) \sin(\pi r x / \ell) \cos n(z-h) dx dz &= \ell B_{rn} \int \cos^2 n(z-h) dz; \quad -\ell \leq x \leq \ell, \quad 0 \leq z \leq h \\ &= \ell B_{rn} (1/4n) (2nh + \sin 2nh) \end{aligned}$$

A_{00} уменьшается вдвое, а коэффициенты при слагаемых, соответствующих мнимым корням, получают подстановкой $n=in'$; так что;

$$\iint f(x, z) \cos(\pi r x / \ell) \cosh n(z-h) dx dz = \ell A_{rn} (1/4n') (2n'h + \sinh 2n'h); \quad -\ell \leq x \leq \ell, \quad 0 \leq z \leq h$$

$$\iint f(x, z) \sin(\pi r x / \ell) \cosh n(z-h) dx dz = \ell B_{rn} (1/4n') (2n'h + \sinh 2n'h); \quad -\ell \leq x \leq \ell, \quad 0 \leq z \leq h$$

Поэтому, теорема принимает вид;

$$f(x,z) = (4/\ell) \sum_r \sum_n [ncosn(z-h)] / (2nh + \sin 2nh) \iint f(\xi, \zeta) \cos[(\pi r/\ell)(\xi-x)] \cdot \\ \cos n(\zeta-h) d\zeta d\xi + (4/\ell) \sum_r [n' \cosh n(z-h)] / (2n'h + \\ \sinh 2n'h) \iint f(\xi, \zeta) \cos[(\pi r/\ell)(\xi-x)] \cosh n(\zeta-h) d\zeta d\xi; -\ell \leq \xi \leq \ell, 0 \leq \zeta \leq h$$

При ℓ стремящемся к бесконечности подставляя $\pi r/\ell = m$ и $\pi/\ell = dm$, получим;

$$f(x,z) = (4/\pi) \sum_n \iint f(\xi, \zeta) [ncosn(z-h)cosn(\zeta-h)] / (2nh + \sin 2nh) \cdot \\ \cos m(\xi-x) d\zeta d\xi dm + (4/\pi) \iint f(\xi, \zeta) [n' \cosh n'(z-h) \cosh n'(\zeta-h)] / (2n'h \\ + \sinh 2n'h) \cos m(\xi-x) d\zeta d\xi dm; 0 \leq \xi \leq \infty, -\infty \leq \zeta \leq \infty, 0 \leq m \leq \infty$$

В случае акватории бесконечной глубины;

$$\begin{aligned} nh &= r\pi + \varepsilon \\ hdn &= \pi \\ \tanh nh &= \tan \varepsilon, \\ \cos n(z-h) &= (-)^r \cos(nz - \varepsilon) \\ 2n + (\sin 2nh)/h &= 2 \\ n \tan \varepsilon &= -km^2, k = v^2/g \\ \sin 2\varepsilon &= (-2km^2 n)/(n^2 + k^2 m^4) \\ \cos 2\varepsilon &= (n^2 - k^2 m^4)/(n^2 + k^2 m^4) \\ \text{Also, } \tanh n'h &= 1, n = km^2 \\ [\cosh n'(z-h) \cosh n'(\zeta-h)] / (2n'h + \sinh 2n'h) &= 1/2 \exp[-n'(z + \zeta)] \end{aligned}$$

Подстановка дает;

$$f(x,z) = (2/\pi^2) \iiint f(\xi, \zeta) [\cos(nz - \varepsilon) \cos(n\zeta - \varepsilon) \cos m(\xi-x)] d\zeta d\xi dm dn \\ + (2U^2/\pi g) \iiint f(\xi, \zeta) m^2 \exp[-km^2(z + \zeta)] \cos m(\xi-x) d\zeta d\xi dm \quad - \\ \infty \leq \xi \leq \infty, 0 \leq \zeta \leq \infty, 0 \leq m \leq \infty; 0 \leq n \leq \infty$$

Используя приведенное выше значение ε , находим;

$$\begin{aligned} \cos(nz - \varepsilon) \cos(n\zeta - \varepsilon) &= \cos n z \cos n \zeta - \cos n(z + \zeta) [(k^2 m^4)/(n^2 + k^2 m^4)] \\ &\quad - \sin n(z + \zeta) [(km^2)/(n^2 + k^2 m^4)] \end{aligned}$$

Интегрируя последние два слагаемых по n ;

$$(k^2 m^4) \int [\cos n(z + \zeta)/(n^2 + k^2 m^4)] dn; 0 \leq n \leq \infty$$

$$\begin{aligned}
&= (\pi/2)km^2 \exp[-km^2(z + \zeta)](km^2) \int [n \sin n(z + \zeta)/(n^2 + k^2 m^4)] dn; \quad 0 \leq n \leq \infty \\
&= (\pi/2)km^2 \exp[-km^2(z + \zeta)]
\end{aligned}$$

Следовательно;

$$f(x, z) = (2/\pi^2) \iiint f(\zeta, \zeta) \cos n z \cos n \zeta \cos m(\zeta - x) d\zeta d\zeta dmdn - (2U^2/\pi g).$$

$$\begin{aligned}
&\iiint f(\zeta, \zeta) m^2 \exp[-km^2(z + \zeta)] \cos m(\zeta - x) d\zeta d\zeta dm \\
&- \infty \leq \zeta \leq \infty, \quad 0 \leq \zeta \leq \infty, \quad 0 \leq m \leq \infty; \quad 0 \leq n \leq \infty
\end{aligned}$$

Рассматривая случай бесконечной глубины, получаем требуемое решение для ϕ ,

$$\begin{aligned}
\phi &= (2U/\pi^2) \iiint f(\zeta, \zeta) \{ [\cos(nz - \varepsilon) \cos(n - \zeta) \cos m(\zeta - x)] / [\sqrt{(m^2 + n^2)}] \} \\
&\exp[-y\sqrt{(m^2 + n^2)}] d\zeta d\zeta dmdn; \quad 0 \leq n \leq \infty, \quad 0 \leq m \leq \infty, \quad 0 \leq \zeta \leq \infty, \quad -\infty \leq \zeta \leq \infty \\
&- (2U^2/\pi g) \iiint f(\zeta, \zeta) [m \exp(-m^2 U^2(z + \zeta))/g] / [\sqrt{(m^2 U^4/g^2 - 1)}] \sin\{m(x - \zeta) \\
&+ y m \sqrt{(m^2 U^4/g^2 - 1)}\} d\zeta d\zeta dm; \quad g/U^2 \leq m \leq \infty, \quad 0 \leq \zeta \leq \infty, \quad -\infty \leq \zeta \leq \infty \\
&+ (2U^2/\pi g) \iiint f(\zeta, \zeta) [m \exp(-m^2 U^2(z + \zeta))/g] / [\sqrt{(m^2 U^4/g^2 - 1)}] \cos\{m(x - \zeta) \\
&+ y m \sqrt{(1 - m^2 U^4/g^2)}\} d\zeta d\zeta dm; \quad 0 \leq m \leq g/U^2, \quad 0 \leq \zeta \leq \infty, \quad -\infty \leq \zeta \leq \infty
\end{aligned}$$

Волновое сопротивление судна по Мичелю может быть найдено посредством интегрирования давления по поверхности судна вдоль всей его длины.

$$R_w = -2 \iint \delta p (d\eta/dx) dx dz$$

$$\delta p = \rho U d\phi/dx$$

$$R_w = -2\rho U \iint (d\phi/dx) (d\eta/dx) dx dz$$

Дифференцируя потенциал скорости ϕ по x и подставляя производную в приведенное выше выражение, приходим к интегралу Мичеля волнового сопротивления в виде;

$$\begin{aligned}
R_w &= (4\rho U^4/\pi g) \iiint f(x, z) f(\zeta, \zeta) [m^2 \exp(-m^2 U^2(z + \zeta))/g] / [\sqrt{(m^2 U^4/g^2 - 1)}] \cdot \cos m(x \\
&- \zeta) dx dz d\zeta d\zeta dm; \\
&g/U^2 \leq m \leq \infty, \quad 0 \leq \zeta \leq \infty, \quad -\infty \leq \zeta \leq \infty, \quad 0 \leq z \leq \infty, \quad -\infty \leq x \leq \infty \\
&= (4\rho U^4/\pi g) \int |(I^2 + J^2)| m^2 / [\sqrt{(m^2 U^4/g^2 - 1)}] dm; \quad g/U^2 \leq m \leq \infty
\end{aligned}$$

$$= (4\rho g^2/\pi U^2) \int |(I^2 + J^2)| \lambda^2 / [\sqrt{(\lambda^2 - 1)}] d\lambda; \quad 1 \leq \lambda \leq \infty$$

Где; $\lambda = mU^2/g$

$$J = \iint f(x,z) \exp(-\lambda^2 gz/U^2) \sin(\lambda gx/U^2) dx dz; \quad -\infty \leq x \leq \infty, \quad 0 \leq z \leq \infty$$

$$I = \iint f(x,z) \exp(-\lambda^2 gz/U^2) \cos(\lambda gx/U^2) dx dz; \quad -\infty \leq x \leq \infty, \quad 0 \leq z \leq \infty$$

Виглей (1942) [6] преобразовал данное выражение к виду, см. параграф 1.16;

$$R_w = (4\rho g^2/\pi U^2) \int |(I^2 + J^2)| \sec^3 \theta d\theta; \quad 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

$$J = bd \iint (\delta\eta/\delta\zeta) \exp(-dg\zeta \sec^2 \theta/U^2) \sin(\ell g\zeta \sec \theta/U^2) \delta\zeta d\zeta; \quad -1 \leq \zeta \leq 1, \quad 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

$$I = bd \iint (\delta\eta/\delta\zeta) \exp(-dg\zeta \sec^2 \theta/U^2) \cos(\ell g\zeta \sec \theta/U^2) \delta\zeta d\zeta; \quad -1 \leq \zeta \leq 1, \quad 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

Где;

b – максимальная полуширина ($B/2$), ℓ – полудлина ($L/2$), d – осадка
 $\zeta = x/\ell$, $\eta = y/b$, $\zeta = z/d$, $\eta_x = \delta\eta/\delta\zeta$, x – продольная координата, отсчитываемая от миделя, y – ордината поверхности корпуса, отсчитываемая от диаметральной плоскости
 $\eta = f(\zeta, \theta)$ уравнение поверхности половины корпуса и
 $\lambda = \sec \theta$

Полученный выше усовершенствованный Виглеем интеграл Мичеля в дальнейшем называется интегралом Мичеля-Виглея в честь обоих исследователей и, в частности, в честь Мичеля в связи с его пионерскими работами в области волнового сопротивления судов и в честь Виглея – за усовершенствование оригинального выражения.

3.3 Основное уравнение – Формула Ньюмена для вычисления волнового сопротивления. Поток энергии, генерируемый в результате движения судна в его следе может быть связан с волновым сопротивлением трехмерного судна [9]. Рассматривая контрольный объем, ограниченный вертикальной контрольной поверхностью $x = \text{Constant}$ и движущийся вместе с судном, можно связать поток энергии через контрольную поверхность с работой, совершаемой судном для преодоления волнового сопротивления. Энергия каждой двумерной составляющей движется в направлении θ с групповой скоростью V_g . Таким образом, скорость передачи энергии через контрольную поверхность, которая движется относительно объема жидкости со скоростью U , дается выражением $(V_g \cos \theta - U)$. Полный поток энергии в направлении x получится, если умножить выражение $(V_g \cos \theta - U)$ на плотность энергии $\frac{1}{2} \rho g A^2$ и проинтегрировать по ширине контрольной поверхности, что дает;

$$dE/dt = \frac{1}{2} \rho g \int A^2 (V_g \cos \theta - U) dz, \quad -\infty \leq z \leq \infty$$

Волновая амплитуда A с помощью метода стационарной фазы может быть аппроксимирована следующим образом;

$$A = |A(\theta)| (2\pi/|RG''(\theta)|)^{0.5}$$

$$V_g = 1/2 V_p = 1/2 U \cos \theta$$

Подставляя это выражение в интеграл потока энергии, получим;

$$D = \pi \rho g \int_{-\infty}^{\infty} |A(\theta)|^2 / RG''(\theta) (1 - 1/2 \cos^2 \theta) dz; -\infty \leq z \leq \infty$$

dz может быть заменено из выражения $x \sec^2 \theta \sin \theta + z \sec^3 \theta (1 + \sin^2 \theta) = 0$, полученного из условия $d/d\theta \{x \cos \theta + z \sin \theta\} / \cos^2 \theta = 0$. Выполняя дифференцирование, имеем ;

$$x (d/d\theta)(\sec^2 \theta \sin \theta) + z (d/d\theta)\{\sec^3 \theta (1 + \sin^2 \theta)\} = -(dz/d\theta)\{\sec^3 \theta (1 + \sin^2 \theta)\}$$

Дважды дифференцируя фазовую функцию $RG(\theta) = (g/U^2)(x \sec \theta + z \sec^2 \theta \sin \theta)$, получим;

$$RG''(\theta) = (g/U^2)[x (d/d\theta)(\sec^2 \theta \sin \theta) + z (d/d\theta)\{\sec^3 \theta (1 + \sin^2 \theta)\}]$$

Следовательно;

$$|dz/d\theta| = |RG''| / [(g/U^2) \sec^3 \theta (1 + \sin^2 \theta)] = (U^2/g) \cos^3 \theta |RG''| / (2 - \cos^2 \theta)$$

Подставляя dz в интеграл потока энергии, получим, следуя Ньюмену, следующее выражение для вычисления волнового сопротивления ;

$$D = R_w = (\pi \rho U^2 / 2) \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |A(\theta)|^2 \cos^3 \theta d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$$

Альтернативно, для симметричного интеграла, приведенное выше выражение может быть представлено в виде;

$$R_w = (\pi \rho U^2) \int_0^{\pi/2} |A(\theta)|^2 \cos^3 \theta d\theta; 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

$A(\theta)$ есть функция волновой амплитуды, $\cos^3 \theta$ в основном ассоциируется с поперечными волнами, а θ есть угол распространения волн. В соответствии с теорией тонкого судна, функция волновой амплитуды $A(\theta)$ по Ньюмену принимает вид;

$$A(\theta) = (2v/\pi) \sec^3 \theta \iint_{\eta_x} \exp[v \sec^2 \theta (z + i x \cos \theta)] dz dx; d \leq z \leq 0, -L/2 \leq x \leq L/2$$

Выделяя действительную часть этого выражения;

$$A(\theta) = (2v/\pi) \sec^3 \theta \iint_{\eta_x} \exp(v \sec^2 \theta z) \cos(v \sec \theta x) dz dx; \quad d \leq z \leq 0, -L/2 \leq x \leq L/2$$

$$\nu = g/U^2$$

Подставляя это выражение для $A(\theta)$ в интеграл волнового сопротивления, приходим к выражению для вычисления волнового сопротивления, напоминающее интеграл Мичеля;

$$R_w = (4\rho g^2/\pi U^2) \int \sec^3 \theta \left| \iint \eta_x \exp(\nu \sec^2 \theta z) \cos(\nu \sec \theta x) dz dx \right|^2 d\theta; 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

Записанное выше выражение может быть представлено в форме интеграла Мичеля следующим образом;

$$R_w = (4\rho g^2/\pi U^2) \int |I_{CP}|^2 \sec^3 \theta d\theta; 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

$$I_{CP} = \iint \eta_x \exp(\nu \sec^2 \theta z) \cos(\nu \sec \theta x) dz dx; d \leq z \leq 0, -L/2 \leq x \leq L/2$$

Где; I_{CP} представляет собой интеграл I , вычисляемый в диаметральной плоскости

3.4 Ревизия основных уравнений. В данном диссертационном исследовании сделана попытка усовершенствовать основные формулы волнового сопротивления, полученные Мичелем-Виглеем и Ньюеном как показано в предыдущих параграфах на основе фундаментального предположения о том, что волновое сопротивление также зависит от конкретной величины максимального угла распространения комбинации расходящихся и поперечных волн первичной волновой системы. Этот угол, обозначаемый как θ_{pmax} принимает различные значения в зависимости от формы корпуса и скорости (числа Фруда) и определяет верхний предел интегрирования вместо используемого в оригинальных формулах Мичеля-Виглея и Ньюена значения $\pi/2$.

Отметим также, что интегралы волнового сопротивления по Мичелю-Виглею и Ньюену содержат сильно осциллирующие функции и с трудом поддаются вычислению. Представляется, что вычислительная неустойчивость связана с суперпозицией поперечных и расходящихся волн, движущихся в различных направлениях. В этой результирующей комбинации волн имеется некоторая осредненная или первичная волновая система, определяющая значение волнового сопротивления и поведение волновых амплитудных функций. Каждая из этих функций содержит бесконечное множество корней. Конечный (последний) корень этого выражения (т.е. точное максимальное значение угла распространения волн θ_{pmax}) соответствует минимальным значениям волновых амплитуд, за которыми следует бесконечное возрастание подынтегральной функции. В результате, все выражения для вычисления волнового сопротивления приобретают вид определенных интегралов с конкретными пределами интегрирования. Этот предложенный автором диссертационного исследования метод представляет собой совершенно новый подход к определению волнового сопротивления, ранее, насколько известно автору, не применявшийся в теории волнового сопротивления. Напомним, что оригинальные выражения Мичеля-Виглея и Ньюена записаны как определенные интегралы соответственно в пределах $0 \leq \theta \leq \pi/2$ и $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$. Однако, недостаток этих формул становится очевидным в связи с тем, что при применении верхнего предела $\theta = \pi/2$ соответствующие интегралы расходятся. В связи с этим, Виглей в частности, при

интегрировании избегал использования верхнего предела $\theta = \pi/2$ и его окрестности.

Исследование подынтегральной функции интеграла волнового сопротивления на предмет определения конечного корня является достаточно трудоемким. Однако найти конечный корень можно графическим путем посредством построения графика подынтегральной функции в функции от угла распространения волн θ . i.e. R_w [N] в функции от θ . При этом конечный корень определяется как точка возврата, в которой имеется скачкообразный переход от отрицательного наклона кривой к положительному наклону кривой (минимум). Конечный (или последний) корень подынтегральной функции может быть определен в ходе итеративного процесса на основе некоторого начального значения θ с повторением вычислений вплоть до получения окончательного значения, за которым других корней при увеличении угла θ не имеется. Этот подход позволяет получить приемлемое согласование теоретических и экспериментальных данных. Отметим, что при дальнейшем увеличении θ от конечного корня до $\pi/2$ подынтегральная функция интеграла волнового сопротивления, содержащая тригонометрические функции $\sec\theta$, $\sec^2\theta$ и $\sec^3\theta$ обнаруживает тенденцию к неограниченному росту вблизи $\pi/2$. В дальнейшем во всех случаях, рассмотренных в данной работе, интеграл волнового сопротивления вычисляется с верхним пределом θ_{pmax} . Таким образом, предложенное автором усовершенствование формул Мичеля-Виглея и Ньюмена для вычисления волнового сопротивления состоит в замене верхнего предела интегрирования $\pi/2$ на θ_{pmax} :

Усовершенствованная формула Мичеля для вычисления волнового сопротивления имеет вид;

$$R_w = (4\rho g^2/\pi U^2) \int |(I^2 + J^2)| \sec^3\theta d\theta; 0 \leq \theta \leq \theta_{pmax}$$

и выражение $(I^2 + J^2)$ эквивалентно квадрату волновой амплитудной функции $|A(\theta)|^2$;

$$|A(\theta)|^2 = |(I^2 + J^2)|$$

Аналогично, формула Ньюмена для вычисления волнового сопротивления имеет вид;

$$R_w = 2(\pi\rho U^2) \int |A(\theta)|^2 \cos^3\theta d\theta; 0 \leq \theta \leq \theta_{pmax}$$

$$A(\theta) = (2v/\pi) \sec^3\theta \iint \eta_x \exp(v \sec^2\theta z) \cos(v \sec\theta x) dz dx; d \leq z \leq 0, -L/2 \leq x \leq L/2$$

Подставляя $A(\theta)$ в записанное выше выражение для R_w , получим следующий вид интеграла Мичеля;

$$R_w = (4\rho g^2/\pi U^2) \int |A(\theta)_{CP}|^2 \sec^3\theta d\theta; 0 \leq \theta \leq \theta_{pmax}$$

где нижний индекс CP относится к диаметральной плоскости.

3.5 Техника вычислений. В применяемой вычислительной процедуре в всех случаях корпус судна разбивался на 138 равных частей по длине и на 8 равных частей по осадке. Интегрирование начинается в каждом шпангоутном сечении, а далее производится в направлении ξ с целью расчета интегралов I и J при расположении начала координат на миделе как показано на Рис. 1.1. Окончательное интегрирование для вычисления волнового сопротивления R_w проводится по углу θ от нуля до максимального значения угла распространения волн с интервалом один градус до точного максимального значения θ_{rmax} при более мелком разбиении в окрестности этого значения в направлении $\theta = \pi/2$. Вычисления проводятся в табличной форме как показано в Таблицах 1.1 - 1.6 и в соответствии с диаграммой расчетных процедур, приведенной на Рис. 1.2 в Приложении 3 и с применением следующих вычислительных процедур:

- Применение метода Симпсона интегрирования однократных и двойных интегралов;
- Использование ординат корпуса $y(x, z)$, отсчитываемых от диаметральной плоскости;
- Разбиение по длине, осадке и азимутальному углу на равные промежутки;
- Интегрирование производится при равных промежутках разбиения по ватерлиниям по $(dz, d\zeta)$, по длине судна $(dx, d\xi)$ и по углу $(d\theta)$;
- Пусть безразмерный интервал по длине dx равен $d\xi$, где $\xi = x/\ell$;
- Пусть безразмерный интервал по ватерлиниям dz равен $d\zeta$, где $\zeta = z/d$;
- Пусть угловой промежуток равен $\Delta\theta$;
- Примем $dx = x_n - x_{n-1}$, $dz = z_n - z_{n-1}$, $dy = y_n - y_{n-1}$;
- Примем $\eta_x = dy/dx = [y(x_n, z_n) - y(x_{n-1}, z_{n-1})]/[x_n - x_{n-1}]$;
при $n = 1, 2, 3, \dots$
- Запишем $\exp(-\lambda^2 gz/U^2) = \exp(-d\lambda^2 g\zeta/U^2) = A$;
- Запишем $\sin(\lambda gx/U^2) = \sin(\ell\lambda g\xi/U^2) = B$;
- Запишем $\cos(\lambda gx/U^2) = \cos(\ell\lambda g\xi/U^2) = C$;
- Заменим λ на $\sec\theta$;
- Примем некоторое значение скорости судна (U) или числа Фруда $(U/\sqrt{gL})$;
- Коэффициенты интегрирования при вычислении двойного интеграла по направлениям ζ и ξ ; $(d\xi/3) \cdot (d\zeta/3) = d\xi d\zeta / 9$;

- Подсчитаем подынтегральный интеграл J табличным методом в Таблицах 1.1 и 1.2;
- Подсчитаем подынтегральный интеграл I табличным методом как показано в Таблицах 1.3 и 1.4;
- Рассчитаем J^2 и I^2 для каждого интервала θ и U ;
- Интервал интегрирования по θ при определении интегралов I и J должен быть согласован с интервалом интегрирования при определении R_w ;
- Повторяем вычисления для следующего промежутка изменения θ в диапазоне $0 \leq \theta \leq \theta_{pmax}$ при значении скорости U ;
- Произведем однократное интегрирование по углу методом Симпсона с использованием табличного метода для получения волнового сопротивления R_w и коэффициента C_w для $0 \leq \theta \leq \theta_{pmax}$ и при значении скорости U в соответствии с форматом Таблиц 1.1 - 1.6 Приложения 3 для усовершенствованных формул Мичеля-Виглея и Ньюмена вычисления волнового сопротивления;
- Проверим существование конечного корня посредством итеративных вычислений первичной (средней) интегральной функции волнового сопротивления при равных интервалах значений θ .

3.6 Экспериментальный анализ. Экспериментальный анализ волнового сопротивления проведен с учетом процедур, рекомендованных в документах МКОБ 1957 года следующим образом;

$$R_T = R_F + R_R$$

$$C_T = C_F + C_R = R_T / (\frac{1}{2} \rho U^2 S)$$

$$C_R = R_R / (\frac{1}{2} \rho U^2 S)$$

$$C_F = 0.075 / (\log R_n - 2)^2$$

Экспериментальные значения волнового сопротивления R_w вычитаются полного экспериментально определенного значения полного сопротивления R_T , полученного и з модельного эксперимента методом форм-фактора $(1+k)$, см., например метод Прохаски (1966), [1]. Как показано на Рис. 1.3 для исследования 1 и исследования 2 и на Рис. 1.4 для исследования 3, значения C_{Tm}/C_{Fom} и F_{nm}^4/C_{Fom} рассчитываются и наносятся на график во всем диапазоне чисел Фруда с целью определения фактора $(1+k)$. Кривая гладко продолжается вплоть до пересечения оси y (C_{Tm}/C_{Fom}), а форм-фактор $(1+k)$ представляет собой значение C_{Tm}/C_{Fom} при $F_{nm}^4/C_{Fom} = 0$.

$$C_{Ts} = C_{vs} + C_{ws}; C_{vs} = (1+k)C_{Fos}$$

$$C_{vm} = (1+k)C_{Fom}; C_{Fom} = C_{Fm}$$

$$C_{ws} = C_{wm} = C_{Tm} - C_{vm} = C_{Tm} - (1+k)C_{Fom}$$

$$R_w = \frac{1}{2}\rho C_w S U^2$$

Анализ исследований 1 и 2 (т.е. для реального корпуса судна) проводился в диапазоне чисел Фруда от 0.362 до 0.508, что покрывает контрактные и эксплуатационные значения скорости судна. Что касается исследований 3, 4, 5 и 6, анализ проводился в диапазоне чисел Фруда от 0.3 до 1.0, в случае исследования 6 - от 0.2 до 0.4.

3.7 Теоретический анализ. Теоретический анализ волнового сопротивления судна и соответствующих коэффициентов методом конечного корня проведен и апробирован для следующих случаев:

- Исследование 1 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Мичеля-Виглея в применении к реальному корпусу корабля прибрежного действия LCS) в сравнении с экспериментальными данными;
- Исследование 2 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Ньюмена в применении к реальному корпусу корабля прибрежного действия LCS) в сравнении с экспериментальными данными;
- Исследование 3 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Ньюмена для корпуса Виглея 1) в сравнении с экспериментальными данными
- Исследование 4 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Мичеля-Виглея в применении к корпусу Виглея 1) в сравнении с экспериментальными данными;
- Исследование 5 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Ньюмена в применении к корпусу Виглея 1) в сравнении с экспериментальными данными и результатами оригинального метода Ньюмена непосредственного вычисления интеграла I;
- Исследование 6 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Ньюмена в применении к корпусу Виглея 1) в сравнении с экспериментальными данными и результатами метода Мичеля-Виглея непосредственного вычисления интеграла J;
- Исследование 7 – Метод конечного корня (усовершенствованный метод Мичеля-Виглея в применении к корпусу Виглея 2) в сравнении с экспериментальными данными и результатами расчета методами вычислительной гидродинамики, примененными в работах [39], [40], [41], [42].

Теоретический анализ, проведенный для семи случаев исследований был выполнен с применением усовершенствованных формул Мичеля-Виглея и Ньюмена вычисления волнового сопротивления в соответствии с методикой вычислений в формате Таблиц 1.1 - 1.6 и пошаговыми процедурами, проиллюстрированными на диаграмме на Рис. 1.2 Приложения 3. Главные измерения корпуса судов, использованные в исследовании приведены ниже:

Основные параметры модели (модель реального корпуса корабля прибрежной):

зоны LCS), Исследования 1 и 2:

Длина между перпендикулярами, L_{BP}	- 6.842 м
Длина по ватерлинии, L_{WL}	- 6.831 м
Осадка, T	- 0.289 м
Ширина по ватерлинии, B_{WL}	- 0.975 м
Площадь смоченной поверхности S при осадке T	- 0.6577м ²

Основные параметры модели (Корпус Виглея 1), Исследования 3, 4, 5 и 6:

Длина между перпендикулярами, L_{BP}	- 1.8 м
Длина по ватерлинии, L_{WL}	- 1.8 м
Осадка, T	- 0.113 м
Длина по ватерлинии, B_{WL}	- 0.180 м
Площадь смоченной поверхности, S при осадке T	- 0.482 м ²

Основные параметры модели (корпус Виглея 2), Исследование 7:

Длина между перпендикулярами, L_{BP}	- 3.048 м
Длина по ватерлинии, L_{WL}	- 3.048 м
Осадка, T	- 0.191 м
Ширина по ватерлинии, B_{WL}	- 0.305 м
Площадь смоченной поверхности, S при осадке T	- 1.381 м ²

3.8 Результаты экспериментального и теоретического анализа и их апробация. Результаты как экспериментального, так и теоретического анализа семи исследований и их соответствующей апробации подытожены в Таблицах 1.7 - 1.22 и на Рис. 1.3 - 1.16 вместе с доказательством наличия корней θ_{pmax} интеграла волнового сопротивления R_w [N]. Интегральная форма функции R_w [N] намеренно нанесена отрезками, проведенными по точкам, соответствующим кривым наилучшего приближения с целью определения корней при получении значения θ_{pmax} , которое является конечной (последней) точкой минимума каждой кривой, получаемой с высокой точностью. Последние корни минимумов кривых (то есть максимальный угол распространения волн θ_{pmax}) показаны в Таблицах 1.14, 1.15 и 1.16. Типовыми примерами теоретического анализа, полученными методами конечного корня приведены в Приложении 3. Форм-фактор $(1+k)$ проанализирован методом Прохаски. Данные по полному сопротивлению и сопротивлению трения оцениваются по данным экспериментов при числах Фруда, меньших 0.2, как рекомендовано в методе МКОБ для определения форм-фактора. Данные по C_{Tm}/C_{Fom} нанесены в функции от F_{nm}^4/C_{Fom} . Значение в точке пересечения прямой линии с осью y , то есть C_{Tm}/C_{Fom} при $F_{nm}^4/C_{Fom} = 0$ как раз совпадает с форм-фактором $(1+k)$. Графики C_{Tm}/C_{Fom} в функции от F_{nm}^4/C_{Fom} для исследований 1, 2 и 3 показаны ниже на Рис. 1.3 и 1.4. В случае исследований 1 и 2, результаты расчета методом конечного корня по усовершенствованным формулам Мичеля-Виглея и Ньюмена расчета волнового сопротивления соответственно сравнивалось с экспериментальными данными по реальным обводам корпуса корабля прибрежного действия (LCS) Королевского малазийского военно-морского флота, для которого модельные эксперименты проводились в Гамбургском исследовательском центре по судостроению (HSVA), Германия.

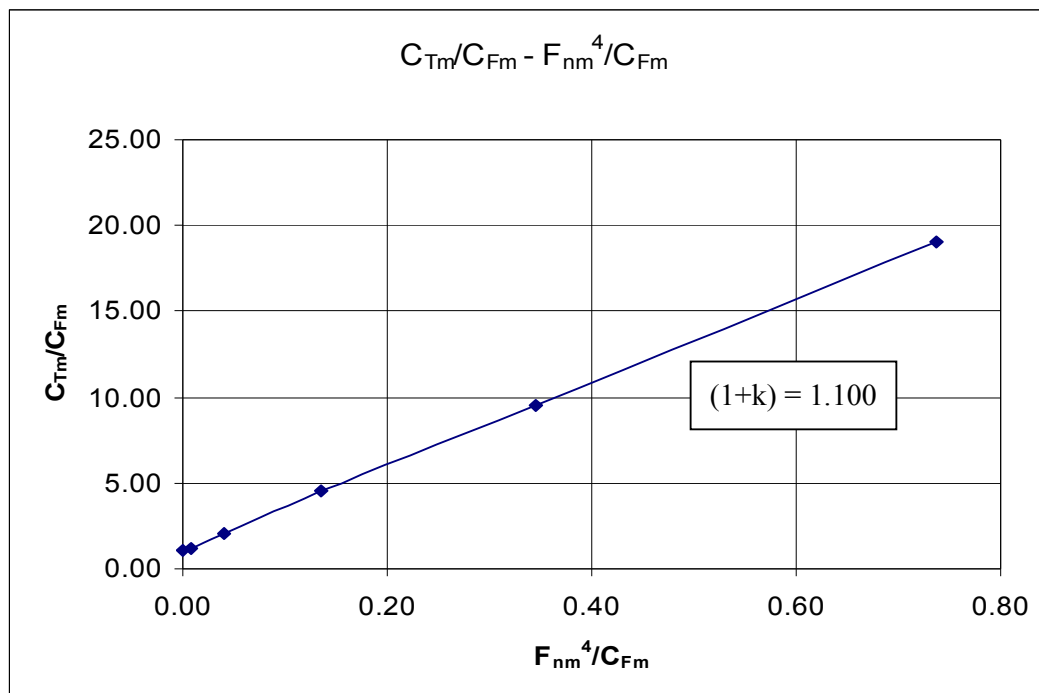


Рис. 1.3 – График C_{Tm}/C_{Fom} в функции от F_{nm}^4/C_{Fom} для форм-фактора $(1+k)$ (Случаи исследований 1 и 2)

Таблица 1.7 – Коэффициенты волнового сопротивления C_w , определенные теоретическим и экспериментальным путем (Исследования 1 и 2)

F_n	$C_w \times 10^3$ Эксперимент (LCS)	$C_w \times 10^3$ МКК (Мичель-Виглей)	$C_w \times 10^3$ МКК (Ньюмен)
0.362	2.565	2.494	2.495
0.397	3.323	3.246	3.233
0.434	4.222	4.097	4.123
0.470	4.738	4.619	4.604
0.508	4.842	4.709	4.697

Таблица 1.8 – Коэффициент волнового сопротивления C_w , найденный теоретическим и экспериментальным путем (Исследование 3 и 4)

F_n	$C_w \times 10^3$ Эксперимент	$C_w \times 10^3$ МКК (Исследование 3 Усовершенствованный метод Ньюмена)	$C_w \times 10^3$ МКК (Исследование 4 Усовершенствованный метод Мичеля-Виглея)
0.30	0.870	0.845	0.833
0.40	2.681	2.599	2.570
0.50	3.951	3.824	3.760
0.60	4.637	4.471	4.403
0.70	4.609	4.435	4.371
0.80	4.485	4.296	4.249
0.90	4.345	4.160	4.108
1.00	4.278	4.056	4.012

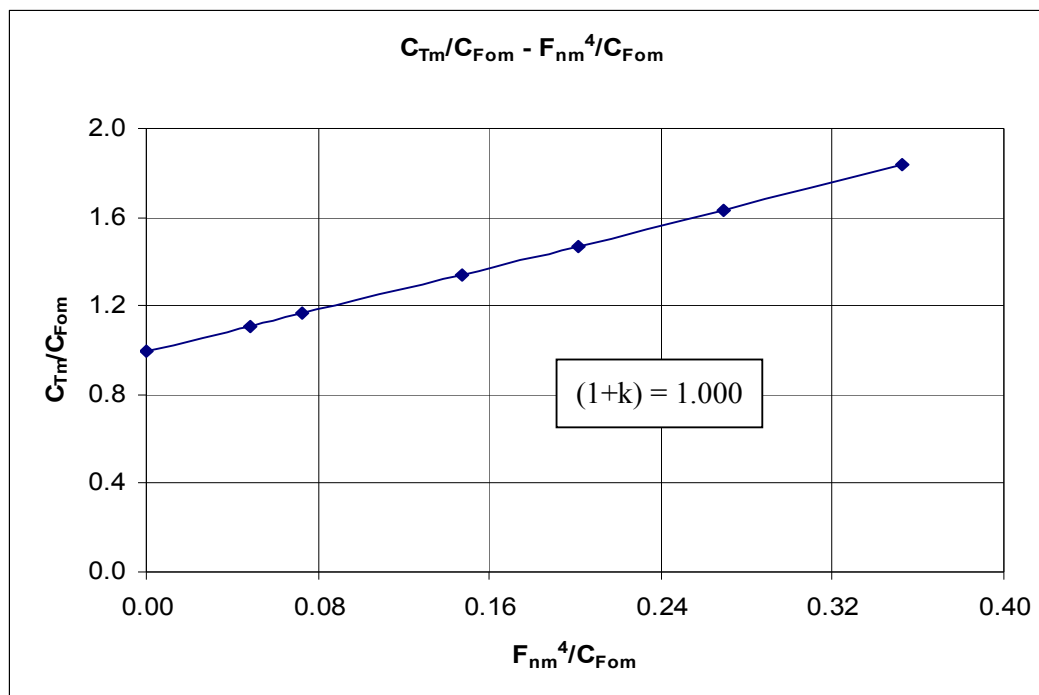


Рис. 1.4 – График C_{Tm}/C_{Fom} в функции от F_{nm}^4/C_{Fom} для фактора (1+k) (Исследование 3)

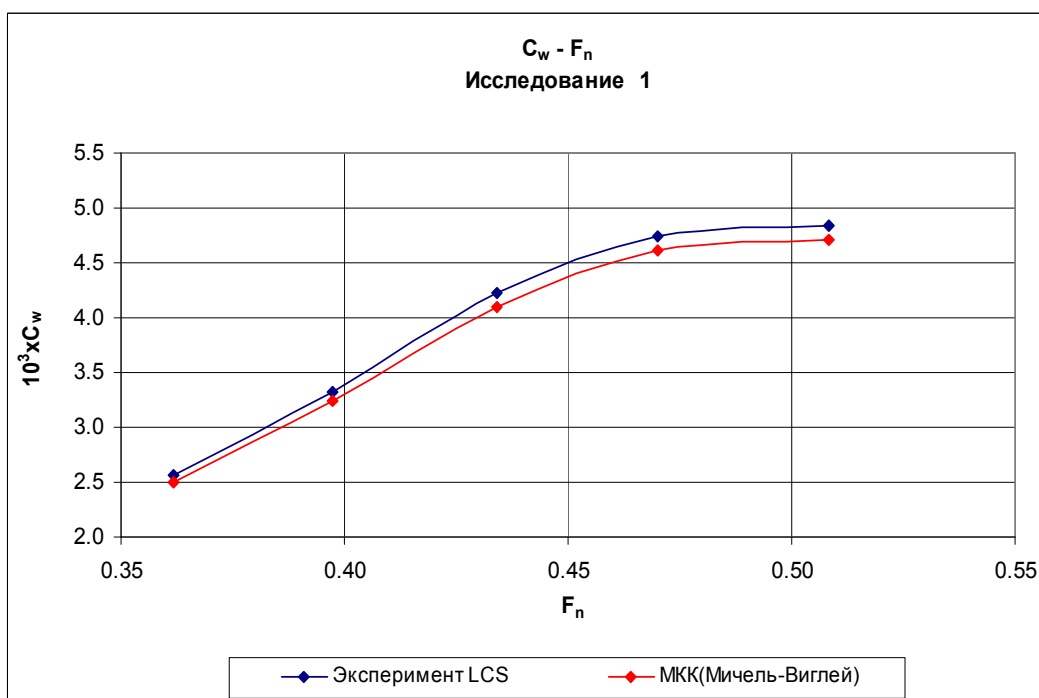


Рис. 1.5 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w в функции от F_n (Исследование 1)

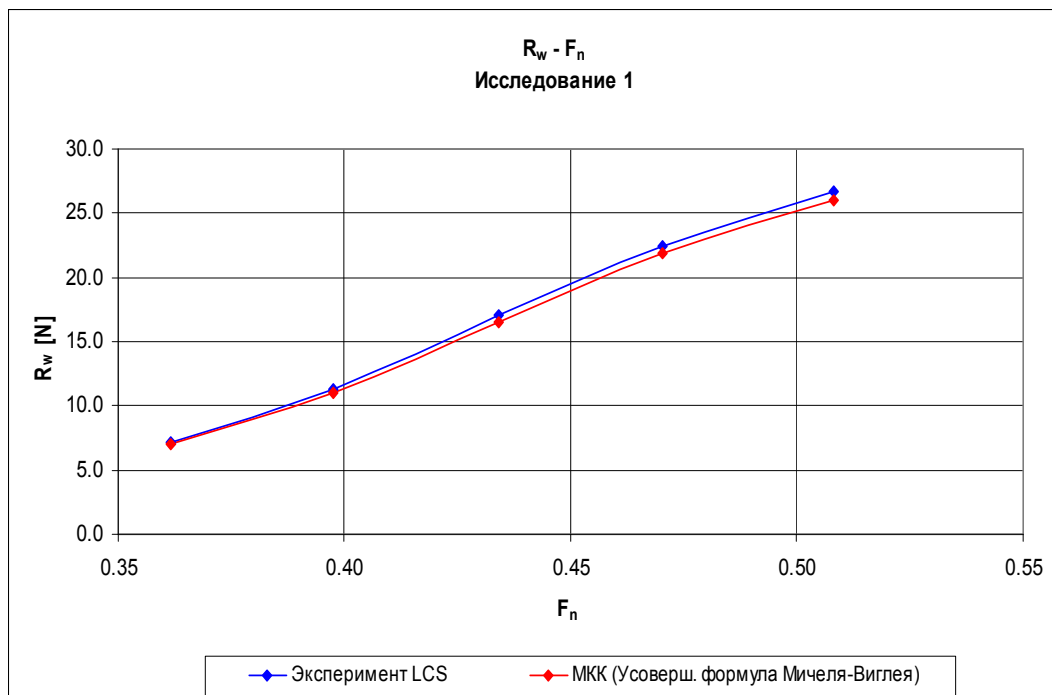


Рис. 1.6 – Графики экспериментальных и теоретических значений R_w [N] в функции от F_n (Исследование 1)

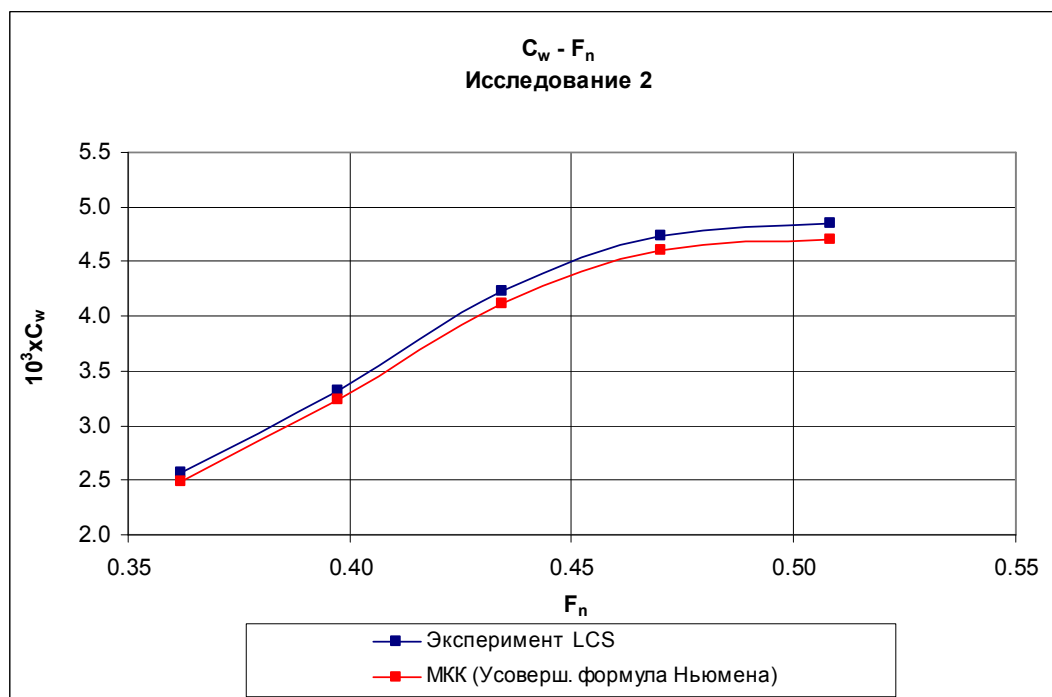


Рис. 1.7 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w в функции от F_n (Исследование 2)

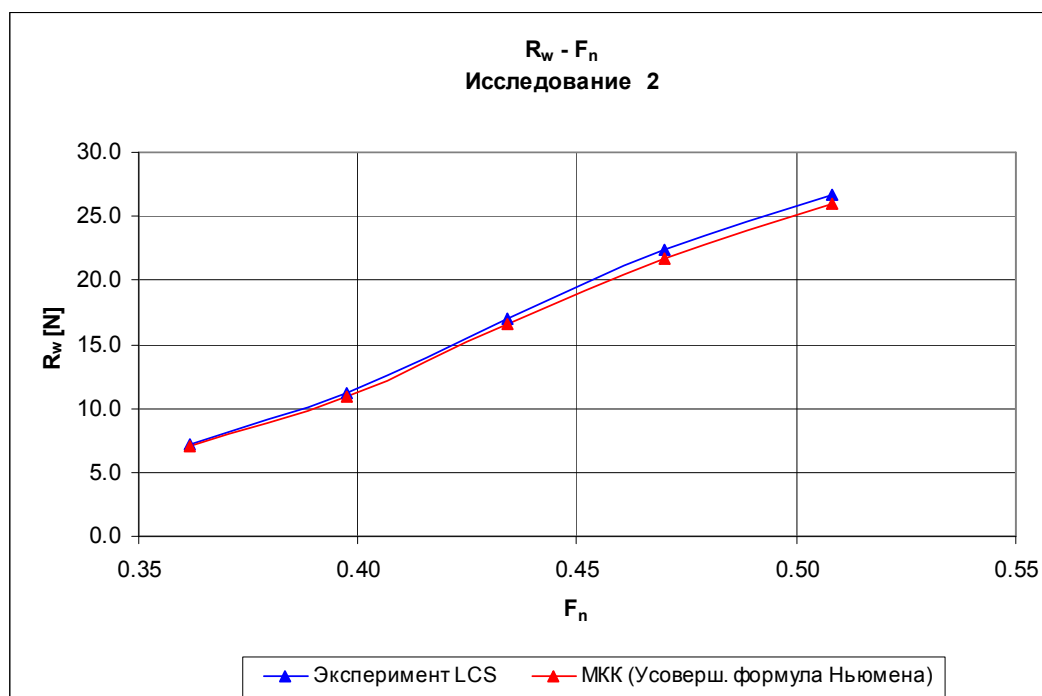


Рис. 1.8 – Графики экспериментальных и теоретических значений R_w в функции от F_n (Исследование 2)

В случае исследований 3 и 4, результаты расчетов методом конечного корня по усовершенствованным формулам Мичеля-Виглея и Ньюмена волнового сопротивления сравнивались соответственно с экспериментальными результатами по модели параболического корпуса Виглея, полученными в Морском технологическом центре Малазийского технологического университета.

Таблица 1.9 – Экспериментальные и теоретические значения коэффициента волнового сопротивления C_w (Исследования 5 и 6)

F_n	$C_w \times 10^3$ Эксперимент	$C_w \times 10^3$ Мичель-Виглей (Исследование 5 Прямое вычисление интеграла J)	$C_w \times 10^3$ Ньюмен (Исследование 6 Прямое вычисление I_{cp})
0.30	0.870	2.980	1.176
0.40	2.681	4.393	2.548
0.50	3.951	5.527	3.740
0.60	4.637	6.453	4.793
0.70	4.609	7.230	5.723
0.80	4.485	7.897	6.512
0.90	4.345	8.479	7.218
1.00	4.278	8.996	7.824

В случае исследования 5, в оригинальной формуле Мичеля-Виглея для вычисления волнового сопротивления, где вычисление интеграла J осуществляется до верхнего предела, соответствующего быстрому нарастанию

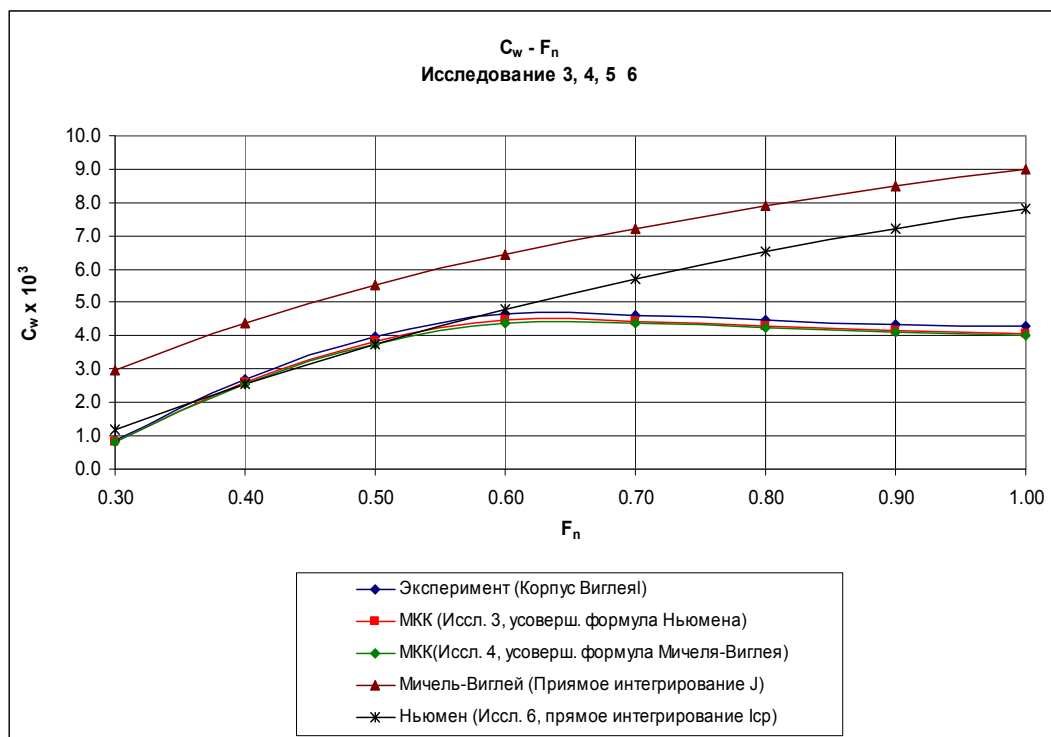


Рис. 1.9 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w в функции от F_n Исследования 3, 4, 5 и 6

Заметим: См. основные соотношения для R_w для случая непосредственного вычисления интегралов I и J в Приложении 3, с.191.

подынтегральной функции, Аналогичным образом, в исследовании 6 Ньюмена, расчет интеграла (I_{cp}) в диаметральной плоскости проводится до такого значения переменной, при котором начинается неограниченное возрастание подынтегральной функции. Оба расчета сравниваются со случаями исследований 3 и 4 и с экспериментом.

Таблица 1.10 – Сангсон Дзю (Эксперимент) и МКК (Теория)
Коэффициент волнового сопротивления C_w (Исследование 7а)

F_n	$C_w \times 10^3$ Сангсон Дзю (Эксперимент)	$C_w \times 10^3$ МКК (Усовершенств. Метод Мичеля-Виглея)
0.20	0.360	0.335
0.22	0.460	0.446
0.25	0.790	0.762
0.27	0.780	0.748
0.28	0.940	0.896
0.32	1.470	1.428
0.34	1.410	1.383
0.37	1.520	1.490
0.40	2.120	2.073

Таблица 1.11 – С.В. Сонг и Р.Е. Бадур CFD (Доусон и Ньюмен-Кельвин),
(Исследование 7b)

F_n	С.В. Сонг и Р.Е. Бадур	
	$C_w \times 10^3$ (CFD Доусон)	$C_w \times 10^3$ (CFD Ньюмен-Кельвин)
0.23	0.611	0.528
0.25	0.722	0.778
0.27	0.722	0.778
0.28	0.889	0.833
0.31	1.361	1.333
0.32	1.333	1.306
0.34	1.167	1.167
0.35	1.111	1.111
0.37	1.167	1.167
0.40	1.667	1.611

Таблица 1.12 – Ф. Лайли, Е. Кампана и У. Булгарелли CFD
(Доусон А.Н., Доусон Ф.Д. и Ньюмен-Кельвин), (Исследование 7с)

F_n	2400 панелей на СП, 800 панелей на поверхности тела		
	$C_w \times 10^3$ (CFD Доусон А.Н.)	$C_w \times 10^3$ (CFD Доусон Ф.Д.)	$C_w \times 10^3$ (CFD Ньюмен-Кельвин)
0.20	0.500	0.400	0.525
0.22	0.550	0.600	0.600
0.24	0.950	0.800	0.950
0.25	0.925	0.825	0.900
0.27	0.850	0.950	0.850
0.28	1.050	1.100	1.050
0.31	1.550	1.600	1.400
0.32	1.500	1.650	1.350
0.34	1.300	1.450	1.200
0.35	1.250	1.400	1.200
0.37	1.400	1.500	1.350
0.40	1.900	2.100	1.850

Таблица 1.13 – Сангсон Дзю, метод волнового профиля
(Экспериментальные значения C_w), (Исследование 7d)

F_n	$C_w \times 10^3$ Сангсон Дзю Волновой профиль (Эксп.)
0.21	0.40
0.23	0.45
0.25	0.70
0.27	0.65
0.29	1.00
0.30	1.20
0.32	1.50
0.33	1.35
0.35	1.20
0.38	1.40
0.40	1.65

В исследовании 7а, формула Мичеля-Виглея реализуется посредством метода конечного корня с применением модели в конфигурации Виглея с размерениями, показанными на с. 60. Затем результаты апробируются путем сравнения с расчетами, выполненными ранее методами вычислительной гидродинамики (CFD), а также с данными эксперимента. Расчетные данные по коэффициентам волнового сопротивления судна вместе с экспериментальными результатами показаны в Таблицах 1.10 - 1.13, а соответствующие графики на Рис. 1.10.

Конечные значения корней θ_{max} для различных случаев, то есть в исследованиях 1, 2, 3, 4, 5 и 7а сведены в Таблицы 1.14 - 1.16 для анализа. Эти конечные корни представляют собой конечные корни минимумов средней (первичной) подынтегральной функции fR_w волнового интеграла, при этом постоянные интегрирования опущены. Площадь под кривой fR_w в функции от угла распространения волн θ умноженная на соответствующие константы в результате интегрирования определяет теоретическое значение волнового сопротивления судна для конкретного значения числа Фруда (конкретной скорости). В целом, результаты, полученные методом конечного корня для усовершенствованных интегралов волнового сопротивления Мичеля-Виглея и Ньюмена были апробированы посредством сопоставления с данными 13 источников, в том числе с экспериментальными данными и результатами, полученными методами вычислительной гидродинамики. Если считать хорошее согласование с экспериментальными данными критерием сравнения и верификации, можно заключить, что метод конечного корня дает результаты, наиболее близкие к экспериментальным.

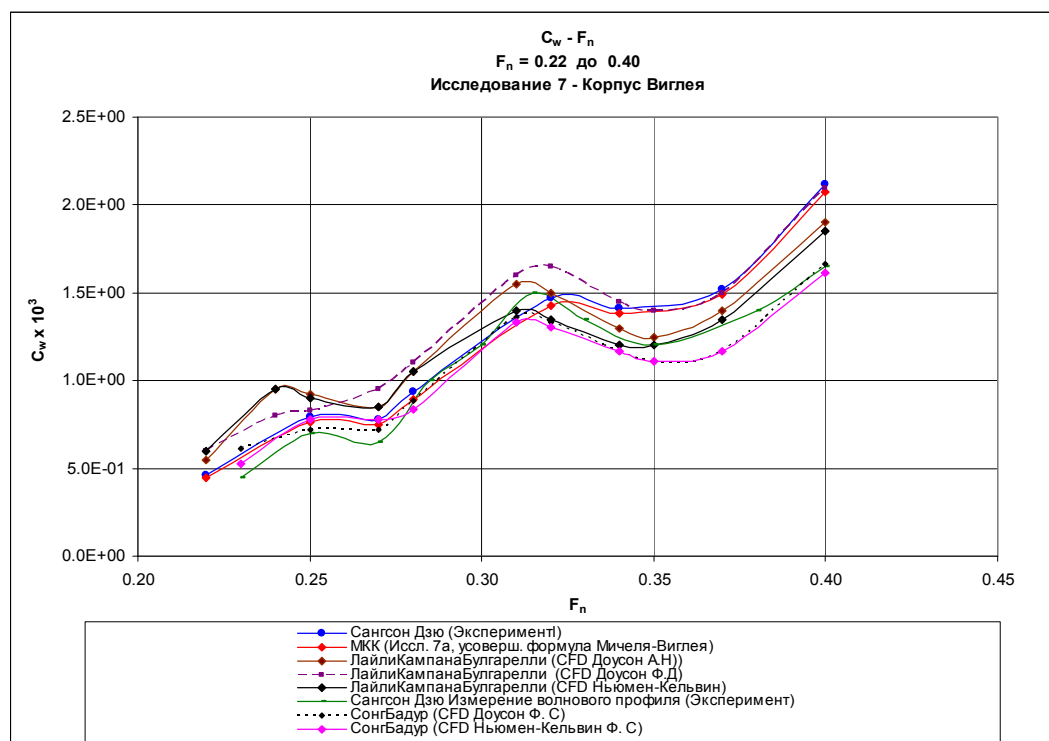


Рис. 1.10 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w в функции от числа F_n (Исследование 7)

Таблица 1.14 – Определение корней θ_{rmax} (Исследования 1 и 2)

U (м/с)	F_n	Точное максимальное значение угла распространения волн θ_{rmax} (Конечный корень) Исследования 1 и 2
2.9618	0.362	89.8726910532665
3.2530	0.397	89.8944607113558
3.5545	0.434	89.9204574443327
3.8486	0.470	89.9321503355514
4.1604	0.508	89.9471775073368

Таблица 1.15 – Определение корней θ_{rmax} (Исследования 3 и 4)

U (м/с)	F_n	Точные значения максимального угла распространения волн θ_{rmax} (МКК)	
		Исследование 3 Усовершен. метод Ньюмена	Исследование 4 Усовершен. Метод Мичеля-Виглея
1.261	0.30	89.8699254785261	89.9031915840131
1.681	0.40	89.9612220467775	89.9108921481451
2.101	0.50	89.9730766640743	89.9302978690104
2.521	0.60	89.9774773063894	89.9377659575867
2.941	0.70	89.9791889522389	89.9599924059215
3.362	0.80	89.9802460184524	89.9693691868137
3.782	0.90	89.9814206959286	89.9893458045552
4.202	1.00	89.9833673029505	89.9949048300982

Таблица 1.16 – Определение корней θ_{rmax} (Исследование 7а)

U (м/с)	F_n	МКК (Исследование 7а Усовершен. Метод Мичеля-Виглея)
1.203	0.22	89.9799997135727
1.367	0.25	89.9869994676201
1.476	0.27	89.990086860906
1.531	0.28	89.9901950541974
1.750	0.32	89.9911986064472
1.859	0.34	89.9958001181212
2.023	0.37	89.9979797181928
2.187	0.40	89.9987001084176

Первичные функции формы интеграла волнового сопротивления R_w [N] рассчитывались для конечной части кривых вблизи значений θ близких $\pi/2$ при разбиении на равные по θ интервалы. Конечные корни располагались вблизи точек изменения наклона кривых от отрицательных до положительных значений. Существование конечных корней подтверждено тем фактом, что за ними других корней первичной функции формы волнового сопротивления не обнаружено. Характерные формы функций формы интеграла волнового сопротивления показаны ниже на Рис. 1.11 -1.16 вместе с типичными расчетными данными.

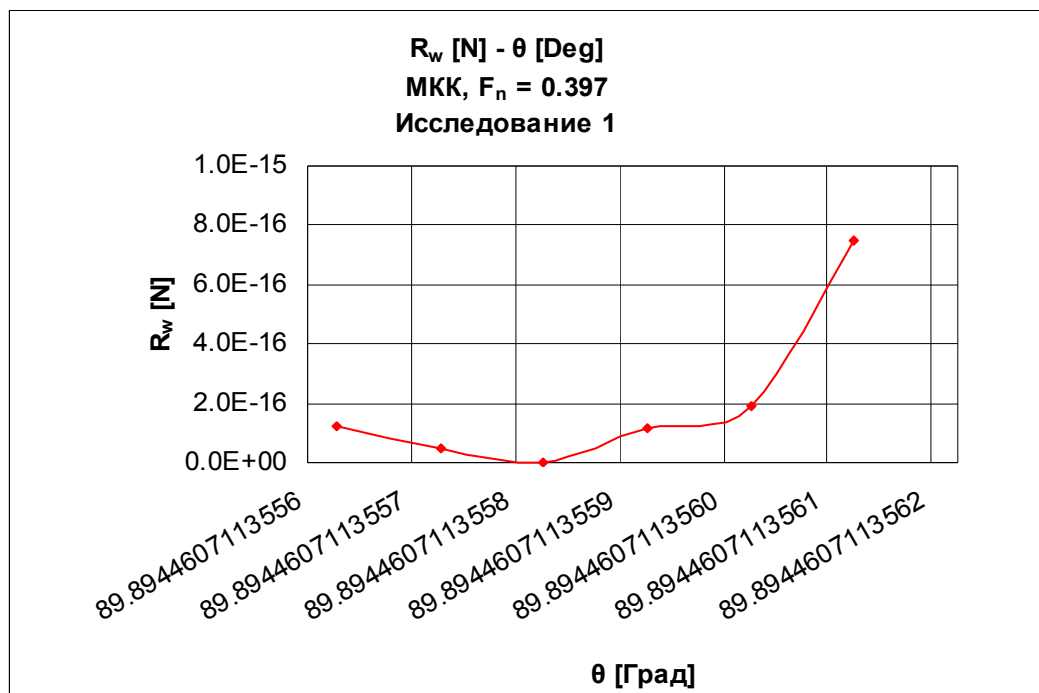


Рис. 1.11 – Функция формы интеграла волнового сопротивления R_w [N], $U = 3.25$ м/с, $F_n = 0.397$, Исследование 1 (Однокорпусное судно к корпусом LCS)

Таблица 1.17 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{pmax}} = 89.8944607113558$ и соответствующая функция R_w [N], $U = 3.25$ м/с, $F_n = 0.397$ Исследование 1 (Однокорпусное судно с корпусом LCS)

MC	θ	$\sec^3 \theta$	I^2	J^2	R_w [N]
1	89.8944607113552	1.6000227072758E+08	9.664871833E-21	6.183082777E-22	6.504541020E-16
4	89.8944607113553	1.6000227072804E+08	6.596337347E-21	4.320478066E-22	1.778298894E-15
2	89.8944607113554	1.6000227072856E+08	3.839724070E-21	2.955338178E-22	5.231446745E-16
4	89.8944607113555	1.6000227072897E+08	2.211343559E-21	1.708515043E-22	6.027351594E-16
2	89.8944607113556	1.6000227072943E+08	8.984513432E-22	8.001355485E-23	1.237839851E-16
4	89.8944607113557	1.6000227072989E+08	1.647133274E-22	2.374435571E-23	4.768294311E-17
2	89.8944607113558	1.6000227073035E+08	1.642754686E-23	5.953568405E-25	2.153539551E-18
4	89.8944607113559	1.6000227073082E+08	4.460223243E-22	8.393542265E-24	1.149748079E-16
2	89.8944607113560	1.6000227073128E+08	1.449340296E-21	4.905269711E-23	1.895592332E-16
4	89.8944607113561	1.6000227073169E+08	2.825875949E-21	1.232883077E-22	7.461878397E-16
2	89.8944607113562	1.6000227073215E+08	4.925750398E-21	2.305832138E-22	1.650050173E-12
4	89.8944607113563	1.6000227073261E+08	7.604670280E-21	3.709335301E-22	5.104458881E-12
1	89.8944607113564	1.6000227073307E+08	1.085527522E-20	5.469898314E-22	1.824388300E-12

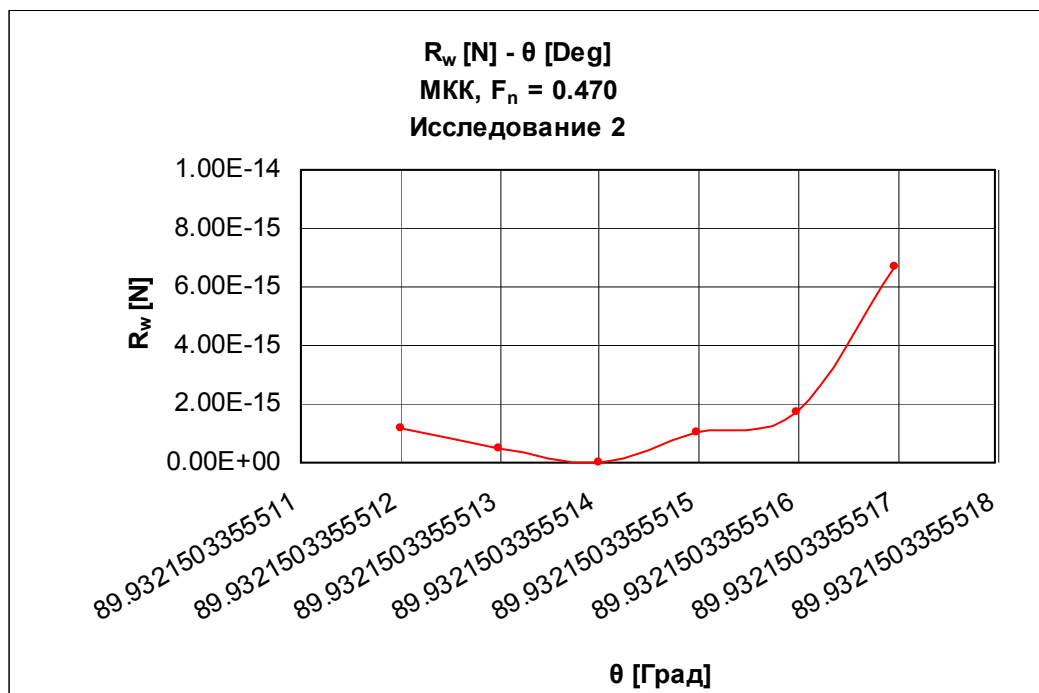


Рис. 1.12 – Функция формы интеграла волнового сопротивления R_w [N], $U = 3.849$ м/с, $F_n = 0.470$, Исследование 2 (Однокорпусное судно с корпусом LCS)

Таблица 1.18 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9321503355514$ функция формы R_w [N], Исследование 2 ($U = 3.849$ м/с, $F_n = 0.470$)

МС	I^2	θ	$\sec^3 \theta$	R_w [N]
1	89.9321503355510	1.660637768E-09	1.407319712E-20	2.395211133E-15
4	89.9321503355511	1.660637768E-09	8.183293947E-21	5.571077160E-15
2	89.9321503355512	1.660637768E-09	3.381634314E-21	1.151085725E-15
4	89.9321503355513	1.660637768E-09	6.614939401E-22	4.503362344E-16
2	89.9321503355514	1.660637768E-09	4.260100386E-23	1.450109706E-17
4	89.9321503355515	1.660637768E-09	1.506664056E-21	1.025716755E-15
2	89.9321503355516	1.660637768E-09	5.067369851E-21	1.724898838E-15
4	89.9321503355517	1.660637768E-09	9.857569656E-21	6.710901688E-15
1	89.9321503355518	1.660637768E-09	1.733723072E-20	2.950738746E-15

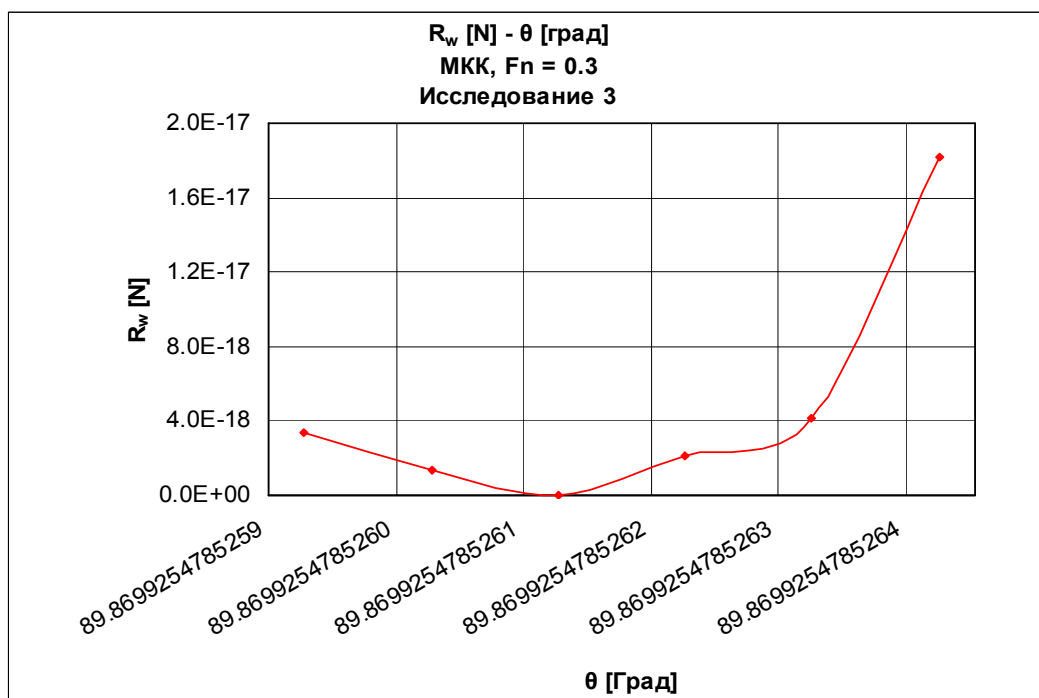


Рис. 1.13 – Функция формы интеграла волнового сопротивления R_w [N], $U = 1.261$ м/с, $F_n = 0.3$, Исследование 3 (Однокорпусное судно с корпусом Виглея)

Таблица 1.19 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{max}} = 89.8699254785261$ и функция формы R_w [N], Исследование 3 (Однокорпусное судно с корпусом Виглея 1)

MC	Γ^2	θ	$\sec^3 \theta$	R_w [N]
1	2.877153779E-28	89.8699254785255	8.546578890E+07	1.700476462E-17
4	1.984556720E-28	89.8699254785256	8.546578890E+07	4.691708890E-17
2	1.268621149E-28	89.8699254785257	8.546578890E+07	1.499579494E-17
4	6.838827717E-29	89.8699254785258	8.546578890E+07	1.616773584E-17
2	2.835203108E-29	89.8699254785259	8.546578891E+07	3.351364941E-18
4	5.824774590E-30	89.8699254785260	8.546578891E+07	1.377040346E-18
2	6.107320828E-33	89.8699254785261	8.546578891E+07	7.219186818E-22
4	9.144313106E-30	89.8699254785262	8.546578891E+07	2.161815516E-18
2	3.517296700E-29	89.8699254785263	8.546578891E+07	4.157636824E-18
4	7.695059591E-29	89.8699254785264	8.546578891E+07	1.819196153E-17
2	1.382060257E-28	89.8699254785265	8.546578891E+07	1.633670716E-17
4	2.039968724E-28	89.8699254785266	8.546578891E+07	4.822708921E-17
1	2.963957928E-28	89.8699254785267	8.546578891E+07	1.751780085E-17

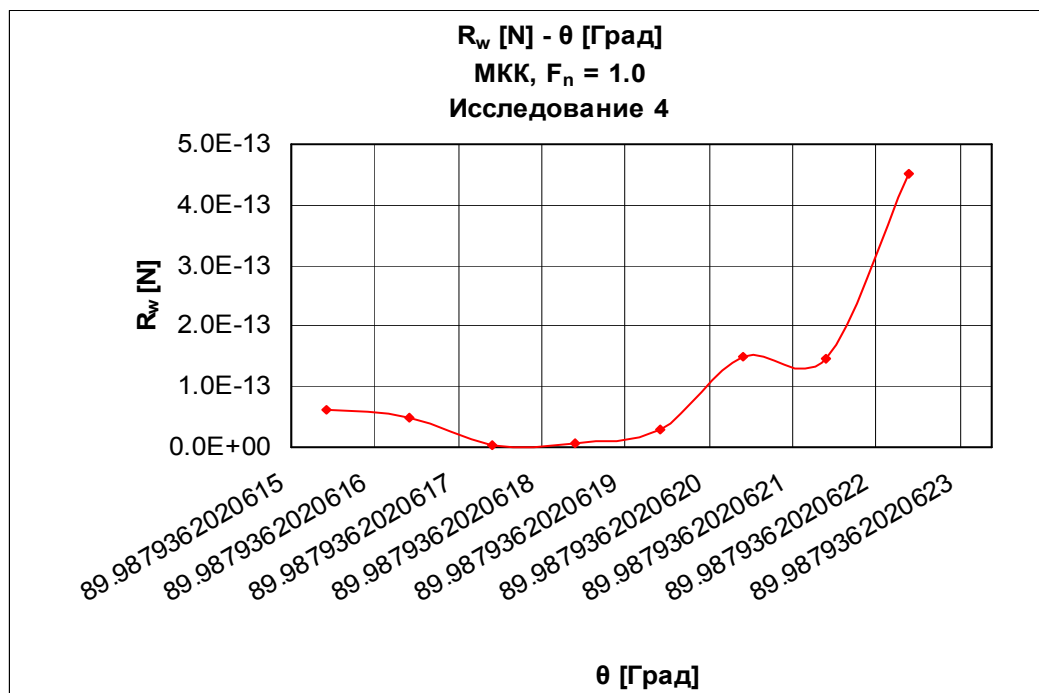


Рис. 1.14 – Функция формы волнового сопротивления R_w [N]
 $U = 4.202$ м/с, $F_n = 1.0$, Исследование 4 (Однокорпусное судно с корпусом Виглея 1)

Таблица 1.20 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9879362020617$
и функция формы R_w [N], Исследование 4 (Однокорпусное судно с корпусом Виглея)

МС	J^2	θ	$\sec^3 \theta$	R_w [N]
1	3.597855294E-26	89.9879362020611	1.071311443E+11	2.298684138E-13
4	2.549135495E-26	89.9879362020612	1.071311443E+11	6.514611456E-13
2	1.680725438E-26	89.9879362020613	1.071311443E+11	2.147644411E-13
4	9.926532228E-27	89.9879362020614	1.071311443E+11	2.536840458E-13
2	4.846487590E-27	89.9879362020615	1.071311443E+11	6.192880614E-14
4	1.879512725E-27	89.9879362020616	1.071311443E+11	4.803312791E-14
2	1.780454791E-28	89.9879362020617	1.071311443E+11	2.275079375E-15
4	2.783111494E-28	89.9879362020618	1.071311443E+11	7.112564262E-15
2	2.179948109E-27	89.9879362020619	1.071311443E+11	2.785555133E-14
4	5.884085070E-27	89.9879362020620	1.071311443E+11	1.503746195E-13
2	1.139079295E-26	89.9879362020621	1.071311443E+11	1.455524636E-13
4	1.768685997E-26	89.9879362020622	1.071311443E+11	4.520082234E-13
1	2.656903427E-26	89.9879362020623	1.071311443E+11	1.697506227E-13

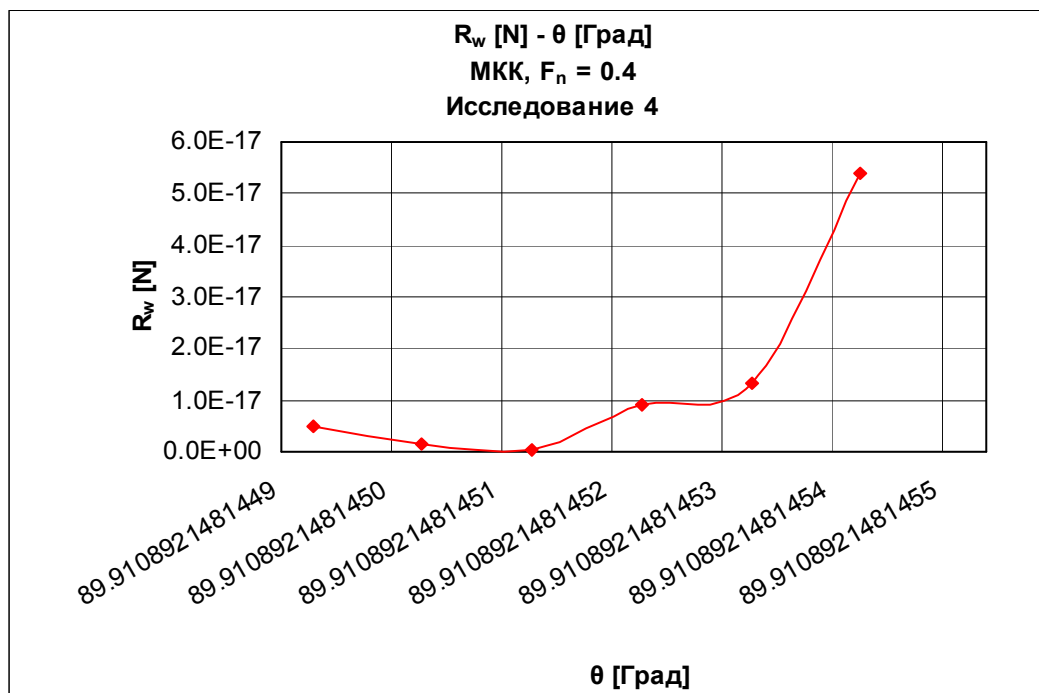


Рис. 1.15 – Функция формы интеграла волнового сопротивления R_w [N]
 $U = 1.681$ м/с, $F_n = 0.4$, Исследование 4 (Однокорпусное судно с корпусом Виглея 1)

Таблица 1.21 - Характерный конечный корень $\theta_{rmax} = 89.9108921481451$
и функция формы R_w [N], Исследование 4 (Однокорпусное судно с корпусом Виглея 1)

МС	J^2	θ	$\text{Sec}^3\theta$	R_w [N]
1	3.548718470E-28	89.9108921481445	2.658401051E+08	3.516357247E-17
4	2.372684224E-28	89.9108921481446	2.658401051E+08	9.404189640E-17
2	1.431751588E-28	89.9108921481447	2.658401051E+08	2.837390519E-17
4	7.264430360E-29	89.9108921481448	2.658401051E+08	2.879274032E-17
2	2.586458060E-29	89.9108921481449	2.658401051E+08	5.125743629E-18
4	4.306325029E-30	89.9108921481450	2.658401051E+08	1.706822038E-18
2	1.841601600E-30	89.9108921481451	2.658401051E+08	3.649615594E-19
4	2.302472495E-29	89.9108921481452	2.658401051E+08	9.125903803E-18
2	6.788545399E-29	89.9108921481453	2.658401051E+08	1.345327955E-17
4	1.363109915E-28	89.9108921481454	2.658401051E+08	5.402718159E-17
2	2.415845540E-28	89.9108921481455	2.658401051E+08	4.787630265E-17
4	3.604160790E-28	89.9108921481456	2.658401051E+08	1.428517593E-16
1	4.836243701E-28	89.9108921481457	2.658401051E+08	4.792141369E-17

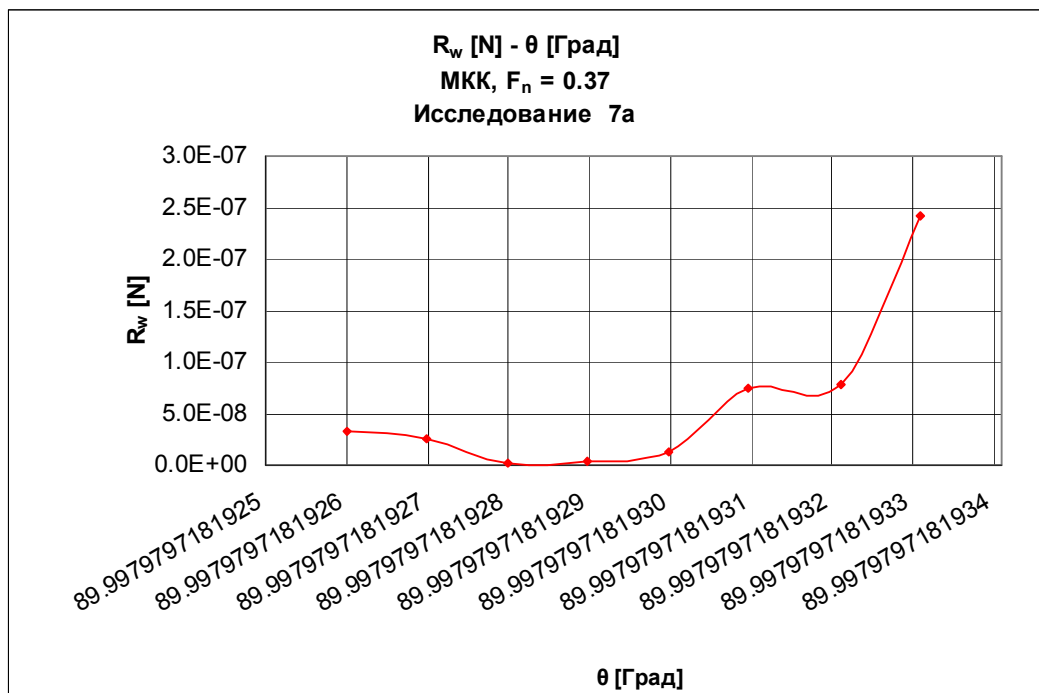


Рис. 1.16 – Функция формы интеграла волнового сопротивления R_w [N]
 $U = 2.023$ м/с, $F_n = 0.37$, Исследование 7а (Однокорпусное судно с корпусом
Виглея 2)

Таблица 1.22 - Характерный конечный корень $\theta_{rmax} = 89.9979797181928$
и функция формы R_w [N], Исследование 7а (Однокорпусное судно с корпусом
Виглея 2)

МС	J^2	θ	$\text{Sec}^3\theta$	R_w [N]
1	2.031245559E-20	89.9979797181922	2.281035467E+13	1.194409342E-07
4	1.442559956E-20	89.9979797181923	2.281035468E+13	3.393005991E-07
2	9.543596840E-21	89.9979797181924	2.281035468E+13	1.122361713E-07
4	5.666485502E-21	89.9979797181925	2.281035469E+13	1.332798626E-07
2	2.794262365E-21	89.9979797181926	2.281035469E+13	3.286154212E-08
4	1.105389988E-21	89.9979797181927	2.281035469E+13	2.599957693E-08
2	1.173357301E-22	89.9979797181928	2.281035470E+13	1.379910879E-09
4	1.341696320E-22	89.9979797181929	2.281035470E+13	3.155767384E-09
2	1.155885423E-21	89.9979797181930	2.281035470E+13	1.359363315E-08
4	3.182493814E-21	89.9979797181931	2.281035471E+13	7.485457049E-08
2	6.663588007E-21	89.9979797181932	2.281035471E+13	7.836621961E-08
4	1.025035443E-20	89.9979797181933	2.281035471E+13	2.410957957E-07
1	1.529162650E-20	89.9979797181934	2.281035472E+13	8.991754588E-08

ГЛАВА 2

2. ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВУХКОРПУСНЫХ СУДОВ (КАТАМАРАНОВ)

2.1 Предыстория. Двухкорпусные суда или катамараны имеют ряд преимуществ по сравнению с однокорпусными судами равного водоизмещения в связи с: большей эксплуатационной скоростью, значительно большей площадью палубы, более устойчивой платформой, меньшей склонностью к бортовой качке, меньшим волновым сопротивлением в определенном диапазоне чисел Фруда благодаря удлинённости корпусов и, неизменно, меньшим полным сопротивлением. Среди недостатков катамаранов по сравнению с однокорпусными судами отметим: большую реакцию по килевой и вертикальной качке, большую сложность конструкции, трудно прогнозируемое волновое взаимодействие между корпусами и возрастание вязкостного сопротивления при более высоких скоростях движения. Эта глава посвящена решению задачи определения волнового сопротивления двухкорпусных судов на основе формулы волнового сопротивления для двухкорпусных судов Така и Лазаускаса (1998), применённой Фалтинсеном (2005) и полученной с использованием линейной теории тонкого судна Мичеля (1898) и с учетом последующих работ Виглея (1942-1948) и Ньюмена (1977). В данном исследовании формула Така_лазаускаса определения волнового сопротивления усовершенствована в том смысле, что при вычислении интеграла волнового сопротивления судна, подобно тому как это сделано в части исследования, посвященной однокорпусным судам, применяется предложенный автором метод конечного корня (МКК). Показано, что существует предельный максимальный угол распространения волн $\theta_{\text{рmax}}$, определение которого позволяет установить верхний предел интегрирования в интеграле волнового сопротивления судна. При этом используется строгая математическая постановка и предложенный алгоритм проведения вычислений. Теоретические результаты апробируются экспериментально для катамаранов с параболическим корпусом Виглея и круглоскулым корпусом Национальной физической лаборатории (NPL). Результаты также апробируются путем сравнения с расчетами, сделанными другими авторами с применением иных методов.

2.2 Основное уравнение Така-Лазаускаса для определения волнового сопротивления двухкорпусных судов. Здесь применен метод Така-Лазаускаса (1998) определения волнового сопротивления многокорпусных судов (использованный позднее Фалтинсеном) для конкретного случая двух корпусов. Соответствующая формула используется с учетом с формулой Ньюмена для определения волнового сопротивления, описанной в Главе 1.

Волновая система в общей системе координат (x, y, z) и при заданных началах координат (x_{j0}, y_{j0}, z_{j0}) составляющих корпусов многокорпусного судна может быть записана в виде;

$$\zeta_j(x,y) = \text{Re} \int A_j(\theta) \exp[(-ig/U^2 \cos^2 \theta)(x_{j0} \cos \theta + y_{j0} \sin \theta)] \cdot \exp[(-ig/U^2 \cos^2 \theta)(x \cos \theta + y \sin \theta)] d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$$

Функция волновой амплитуды;

$$A(\theta) = \sum A_j(\theta) \exp[(-ig/U^2 \cos^2 \theta)(x \cos \theta + y \sin \theta)]; j = 1, 2, \dots, n$$

Отделяя действительную часть;

$$A(\theta) = \sum A_j(\theta) \cos[(-g/U^2 \cos^2 \theta)(x \cos \theta + y \sin \theta)]; j = 1, 2, \dots, n$$

$$A(\theta)_{CP} = \sum A_j(\theta) \cos[(-g/U^2 \cos^2 \theta)x]; j = 1, 2, \dots, n; \text{ for } y = 0$$

Волновое сопротивление двухкорпусного судна R_w зависит от квадрата скорости U^2 , квадрата волновой амплитудной функции $|A(\theta)|^2$, коэффициента взаимодействия корпусов $HIF_T(\theta)$ и $\cos^3 \theta$, ассоциированного с поперечными волнами. Математическое выражение для волнового сопротивления двухкорпусного судна может быть получено из общего выражения для многокорпусного судна, полагая $j = 1$ и 2 , с учетом отсутствия продольного разнеса корпусов $x = 0$ и принимая значения волновой амплитудной функции в плоскости $y = 0$, в следующем виде;

$$R_w = (\pi \rho U^2 / 2) \int |A(\theta)_{CP}|^2 HIF_T(\theta) \cos^3 \theta d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$$

Где $(\pi \rho U^2 / 2) \int |A(\theta)_{CP}|^2 \cos^3 \theta d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ есть выражение для волнового сопротивления судна, полученное Ньюменом для однокорпусного судна.

Следуя Ньюмену [9], запишем волновую амплитудную функцию $A(\theta)$ в виде;

$$A(\theta) = (2v/\pi) \sec^3 \theta \iint (\partial \eta / \partial x) \exp[v \sec^2 \theta (z + ix \cos \theta)] dz dx; 0 \leq z \leq d, -\ell \leq x \leq +\ell$$

По Таку-Лазаускасу (1998) коэффициент гидродинамического взаимодействия корпусов $HIF_T(\theta)$ для случая отсутствия продольного выноса и при идентичных корпусах равен;

$$HIF_T(\theta) = 4 \cos^2 [0.5(2p/L) \sin \theta / (Fn^2 \cos^2 \theta)]$$

Следуя Мичелю [3];

$$\iint_{CP} (\partial \eta / \partial x) \exp[v \sec^2 \theta (z + ix \cos \theta)] dz dx = I_{CP}$$

$$\text{Поэтому } A(\theta)_{CP} = (2v/\pi) \sec^3 \theta I_{CP}$$

Где;

$A(\theta)_{CP}$ – волновая амплитудная функция, рассчитанная в диаметральной плоскости судна и равная аналогичной функции, используемой в оригинальном интеграле Мичеля I . Нижний индекс CP относится к диаметральной плоскости

$$v = g/U^2$$

Коэффициент взаимодействия корпусов $HIF_T(\theta)$ зависит от поперечного расстояния между центральным и боковыми корпусами ($2p$), общей длины (L), угла распространения волн (θ) и числа Фруда (Fn). Формула Така-Лазаускаса для

вычисления волнового сопротивления впервые используется в этой работе в связи с работой Мичеля-Виглея, в которой соответствующее выражение принимает вид:

$$R_w = (4\rho g^2/\pi U^2) \int_0^{\pi/2} |(I^2 + J^2)| HIF_T(\theta) \sec^3 \theta d\theta; \quad 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

Где $(4\rho g^2/\pi U^2) \int_0^{\pi/2} |(I^2 + J^2)| HIF_T(\theta) \sec^3 \theta d\theta; \quad 0 \leq \theta \leq \pi/2$ есть формула Мичеля-Виглея для волнового сопротивления

2.3. Усовершенствование основного уравнения. Гипотетически, волновое сопротивление движущегося в воде судна также зависит от точного значения максимального угла распространения комбинации расходящихся и поперечных волн. Этот угол, который соответствует верхнему пределу волнового интеграла, заменяет значение $\pi/2$ в оригинальных выражениях Ньюмена и Мичеля-Виглея, для определенной скорости судна может быть найден посредством вычисления последнего корня подынтегральной функции или функции волновых амплитуд. Это единственное максимальное значение угла обозначен здесь как θ_{pmax} . Как и в случае однокорпусных судов, для катамарана также имеется соответствующая волновая подынтегральная функция, ассоциированная с волновой системой генерируемой движущимся двухкорпусным судном. Математически, подынтегральная функция fR_w для катамарана содержит множество корней, нахождение которых связано с определенными трудностями. Наличие этих корней легко демонстрируется графически, если построить график подынтегральной функции в зависимости от угла распространения волн θ , то есть R_w [N] от θ . Положения корней соответствуют точкам возврата (инфлексии), где наклоны кривых меняют знак с положительного на отрицательный (+ve до -ve) для максимумов кривой и с отрицательного на положительный (-ve to +ve) для минимумов кривой. Основное внимание в расчетах уделяется определению конечного корня по θ , который существует в некоторой окрестности $\pi/2$. Его значение и соответствует точному значению максимального угла распространения волн θ_{pmax} за которым не существует никаких других корней.

Исследование подынтегральной функции волнового сопротивления посредством ее расчета при большом числе промежутков разбиения по θ показывает, что за значением угла, равного θ_{pmax} , эта функция неограниченно возрастает с приближением θ к $\pi/2$. Введение в рассмотрение значения θ_{pmax} завершает решение проблемы определения волнового сопротивления и в этом заключается усовершенствование оригинального волнового интеграла для двухкорпусных судов. Таким образом, усовершенствованное выражение для определения волнового сопротивления катамарана может быть записано следующим образом;

$$R_w = (\pi \rho U^2) \int_0^{\theta_{pmax}} |A(\theta)_{CP}|^2 HIF_T(\theta) \cos^3 \theta d\theta; \quad 0 \leq \theta \leq \theta_{pmax}$$

$$\begin{aligned} A(\theta)_{CP} &= (2v/\pi) \sec^3 \theta \iint (\partial \eta / \partial x) \exp[v \sec^2 \theta (z + ix \cos \theta)] dz dx \\ &= 2v/\pi \sec^3 \theta \iint \eta_x \exp[(gz/U^2) \sec^2 \theta] \cos[(gx/U_2) \sec \theta] dz dx; \\ &\quad 0 \leq z \leq d, -\ell \leq x \leq +\ell \\ &= (2v/\pi) \sec^3 \theta I_{CP} \end{aligned}$$

$A(\theta)_{CP}$ можно выразить при безразмерных z и x следующим образом;

$$A(\theta)_{CP} = bd(2v/\pi)sec^3\theta \iint \eta_x \exp[(g\zeta/U^2)sec^2\theta] \cos[(g\zeta/U_2)sec\theta] d\zeta d\xi; \\ 0 \leq \zeta \leq d, -1 \leq \xi \leq +1$$

Где $\zeta = z/d$, $\xi = x/\ell$; $\ell = L/2$; $\eta_x = \partial\eta/\partial x$; L – длина судна; d – осадка

С учетом геометрии половины корпуса, фигурирующей в формуле Мичеля - Виглея, усовершенствованное выражение для волнового сопротивления принимает вид .

$$R_w = (4\rho g^2/\pi U^2) \int |(I^2 + J^2)| HIF_T(\theta) sec^3\theta d\theta; 0 \leq \theta \leq \theta_{pmax}$$

2.4. Техника вычислений. При вычислении интегралов I и J и волнового сопротивления в случае катамарана использовались тот же метод интегрирования и техника вычислений как и в Главе 1 для случая однокорпусных судов. Значения интегралов берутся по предварительно вычисленным по отдельным подпрограммам для аналогичной формы корпуса соответствующих однокорпусных судов. Однако, для двухкорпусных судов дополнительно следует вычислить коэффициент гидродинамического взаимодействия $HIF_T(\theta)$, а интегрирование для R_w выполняется в табличном виде, см. Таблицу 2.1 с применением численных алгоритмов проиллюстрированных на Рис. 2.1 Приложения 4, причем интегралы I и J рассчитаны с применением техники вычислений аналогичной приведенной в Таблицах 1.1 - 1.4 Главы 1 Приложения 3.

2.5. Экспериментальный анализ. Экспериментальное исследование волнового сопротивления судна было выполнено на основе методики МКОБ 1957 и метода форм-фактора Прохаски с использованием модели с корпусом Виглея и главными размерениями, аналогичными принятым для однокорпусного судна. Экспериментальные данные для двухкорпусного судна (корпус Виглея 1) были предоставлены Морским технологическим центром Малазийского технологического университета и проанализированы с целью апробации теоретических результатов, полученных методом конечного корня. Данные по полному сопротивлению R_T были получены из экспериментов в диапазоне чисел Фруда от 0.3 до 1.0 и значений относительного расстояния между корпусами $2p/L$, равного 0.3, 0.4 и 0.5. Результаты экспериментального анализа для исследований 1 и 2 приведены в Таблицах 2.2 - 2.6 и на Рис. 2.4 - 2.7 и 2.11. Экспериментальные данные других авторов показаны с целью апробации в соответствующих Таблицах на следующих страницах и заимствованы из работ, на которые даны соответствующие ссылки.

2.6. Теоретический анализ. Теоретический анализ проводился в соответствии с усовершенствованным выражением для расчета волнового сопротивления многокорпусных судов и с применением техники вычислений, аналогичной примененной в Таблице 2.1 Приложения 4. Значения интегралов I и J для выбранного разбиения по углу θ взяты из расчетов по отдельным подпрограммам. Далее для каждого интервала θ рассчитывается коэффициент гидродинамического взаимодействия корпусов $HIF_T(\theta)$ и волновое сопротивление R_w при заданной скорости. Далее необходимо провести итеративные расчеты $R_w[N]$ с целью определения конечного корня θ_{pmax} . Расчетные данные для

характерной формы подынтегральной функции R_w [N] приведены в соответствующих Таблицах 2.7 - 2.42, что можно рассматривать и как подтверждение существования конечного корня θ_{rmax} . Некоторые апробации метода конечного корня выполнены также путем сравнения с работами М. Инсела, А.Ф. Молланда и Дж.Ф. Велликома [44] для корпуса NPL при относительном расстоянии между корпусами, равном $2p/L = 0.3$ и $2p/L = 0.5$ и в некотором диапазоне чисел Фруда.

2.7. Результаты экспериментального и теоретического анализа и их апробация. Исследование и апробация метода конечного корня для двухкорпусных судов выполнена с использованием усовершенствованной формулы Така-Лазаускаса вычисления волнового сопротивления при подынтегральных функциях Мичеля-Виглея и Ньюмена для следующих случаев:

- Исследование 1 – МКК (Усовершенствованная формула Ньюмена в применении к корпусу Виглея 1) в сравнении с экспериментом для $2p/L = 0.3, 0.4, 0.5$;
- Исследование 2 – МКК (усовершенствованная формула Мичеля-Виглея в применении к корпусу Виглея 1) в сравнении с экспериментом для $2p/L = 0.3, 0.4, 0.5$;
- Исследование 3 – МКК (Усовершенствованная формула Ньюмена в применении к корпусу NPL) в сравнении с экспериментальными данными и решением Инсела-Молланда-Велликома для $2p/L = 0.3$;
- Исследование 4 – МКК (Усовершенствованная формула Мичеля-Виглея в применении к корпусу NPL) в сравнении с экспериментальными данными и решением Инсела-Молланда-Велликома для $2p/L = 0.5$.

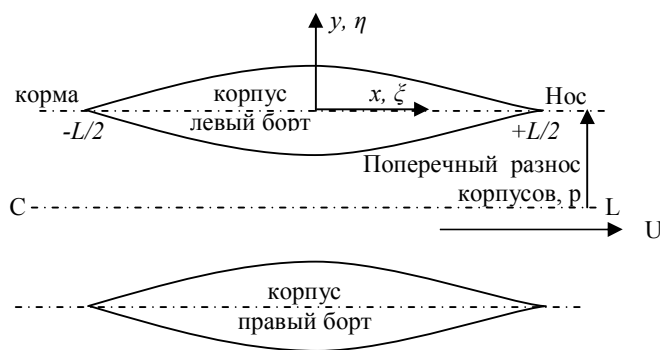


Рис. 2.2 – Конфигурация двухкорпусного судна (вид сверху) и система координат

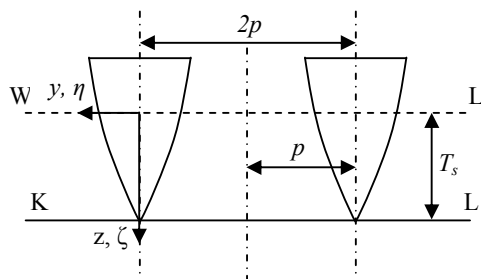


Рис. 2.3 – Конфигурация двухкорпусного судна (вид спереди) и система координат

$2p$ – Поперечное расстояние между ДП корпусов (катамаран)
 T_s – Осадка корпусов, WL – Ватерлиния, KL – Киль

Главные размерения корпусов катамарана (корпус NPL):

Длина по ватерлинии, L_{WL} - 1.6 м
 Осадка, T - 0.089 м
 Ширина по ватерлинии, B_{WL} - 0.178 м
 Водоизмещение, Δ - 0.0101 т
 Площадь смоченной поверхности, S при осадке T - 0.338 м²

Замечание: Размеры модели корпуса Виглея 1 см. в Главе 1.

Таблица 2.2 – Результаты экспериментального анализа
 ($2p/L = 0.3$, Корпус Виглея 1)

F_n	$C_T \times 10^3$	$C_F \times 10^3$	$C_w \times 10^3$	R_T [N]	R_w [N]
0.30	5.9881	3.8309	1.5826	4.5773	1.2076
0.40	7.9517	3.6237	3.7844	10.7959	5.1339
0.50	10.4452	3.4741	6.4500	22.1593	13.6717
0.60	8.7203	3.3586	4.8579	26.6370	14.8278
0.70	7.4714	3.2653	3.7163	31.0815	15.4395
0.80	6.8939	3.1875	3.2283	37.4778	17.5176
0.90	6.8144	3.1212	3.2250	46.9152	22.1485
1.00	7.0362	3.0628	3.5140	60.0037	29.7937

Таблица 2.3 – Результаты экспериментального анализа
 ($2p/L = 0.4$, Корпус Виглея 1)

F_n	$C_T \times 10^3$	$C_F \times 10^3$	$C_w \times 10^3$	R_T [N]	R_w [N]
0.30	5.9158	3.8309	1.5103	4.5220	1.1524
0.40	7.9628	3.6237	3.7955	10.8111	5.1490
0.50	10.7420	3.4741	6.7468	22.7889	14.3008
0.60	8.5178	3.3586	4.6554	26.0185	14.2097
0.70	7.6690	3.2653	3.9139	31.9037	16.2604
0.80	7.4178	3.1875	3.7522	40.3259	20.3605
0.90	7.5314	3.1212	3.9420	51.8519	27.0726
1.00	7.4310	3.0628	3.9088	63.3704	33.1411

Таблица 2.4 - Результаты экспериментального анализа
 ($2p/L = 0.5$, Корпус Виглея 1)

F_n	$C_T \times 10^3$	$C_F \times 10^3$	$C_w \times 10^3$	R_T [N]	R_w [N]
0.30	5.4252	3.8309	1.7858	4.1470	1.3627
0.40	7.7741	3.6237	4.3316	10.5549	5.8761
0.50	9.7375	3.4741	6.4371	20.6578	13.6444
0.60	8.6059	3.3586	5.4152	26.2876	16.5289
0.70	7.8601	3.2653	4.7581	32.6988	19.7675
0.80	7.4475	3.1875	4.4194	40.4873	23.9809
0.90	7.3141	3.1212	4.3490	50.3560	29.8673
1.00	6.7444	3.0628	3.8347	57.5150	32.5134

Таблица 2.5 – Экспериментальный коэффициент волнового сопротивления судна C_w (Исследование 1, Корпус Виглея 1)

F_n	Экспериментальные значения $10^3 \times C_w$		
	$2p/L=0.3$	$2p/L=0.4$	$2p/L=0.5$
0.30	1.5826	1.5103	1.7858
0.40	3.7844	3.7955	4.3316
0.50	6.4500	6.7468	6.4371
0.60	4.8579	4.6554	5.4152
0.70	3.7163	3.9139	4.7581
0.80	3.2283	3.7522	4.4194
0.90	3.2250	3.9420	4.3490
1.00	3.5140	3.9088	3.8347

Таблица 2.6 – Экспериментальный коэффициент волнового сопротивления судна R_w [N] (Исследование 1, Корпус Виглея 1)

F_n	Экспериментальные значения R_w [N]		
	$2p/L=0.3$	$2p/L=0.4$	$2p/L=0.5$
0.30	1.2076	1.1524	1.3627
0.40	5.1339	5.1490	5.8761
0.50	13.6717	14.3008	13.6444
0.60	14.8278	14.2097	16.5289
0.70	15.4395	16.2604	19.7675
0.80	17.5176	20.3605	23.9809
0.90	22.1485	27.608	29.8673
1.00	29.7937	33.1411	32.5134

Таблица 2.7 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления судна C_w (Исследование 1, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Ньюмена)

F_n	МКК, усоверш. формула Ньюмена $10^3 \times C_w$		
	$2p/L=0.3$	$2p/L=0.4$	$2p/L=0.5$
0.30	1.5069	1.4326	1.6989
0.40	3.5988	3.6174	4.1219
0.50	6.1468	6.3977	6.1209
0.60	4.6315	4.4246	5.1478
0.70	3.5410	3.7217	4.5209
0.80	3.0671	3.5662	4.2025
0.90	3.0708	3.8249	4.1329
1.00	3.3497	3.7234	3.7263

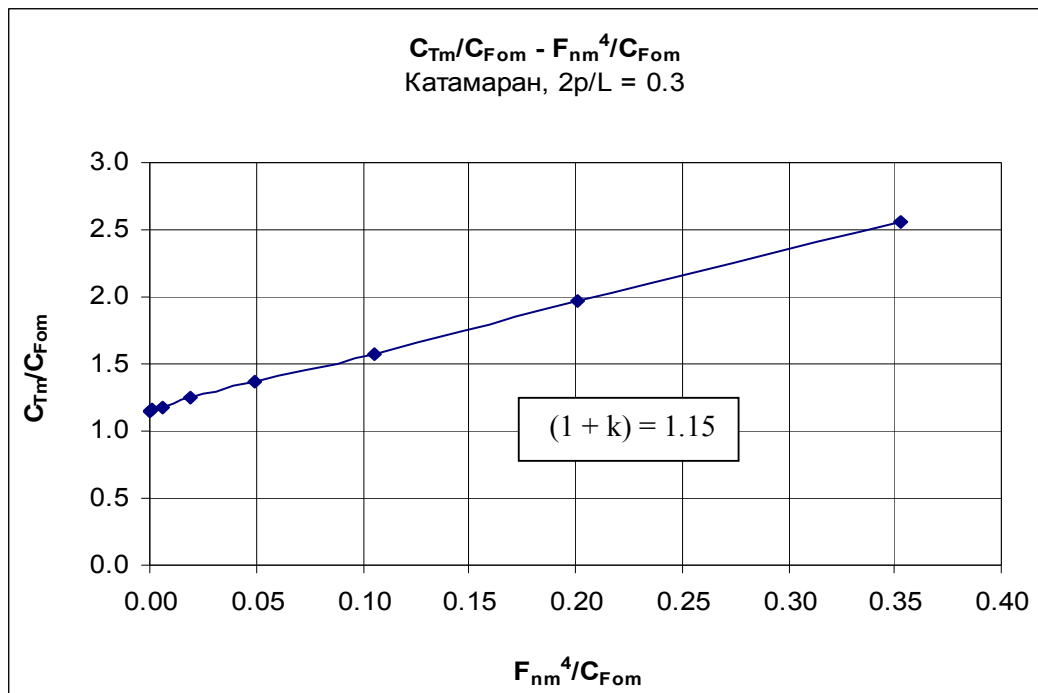


Рис. 2.4 – График C_{Tm}/C_{Fom} в зависимости от F_{nm}^4/C_{Fom} для форм-фактора $(1+k)$ ($2p/L = 0.3$, Корпус Виглея 1)

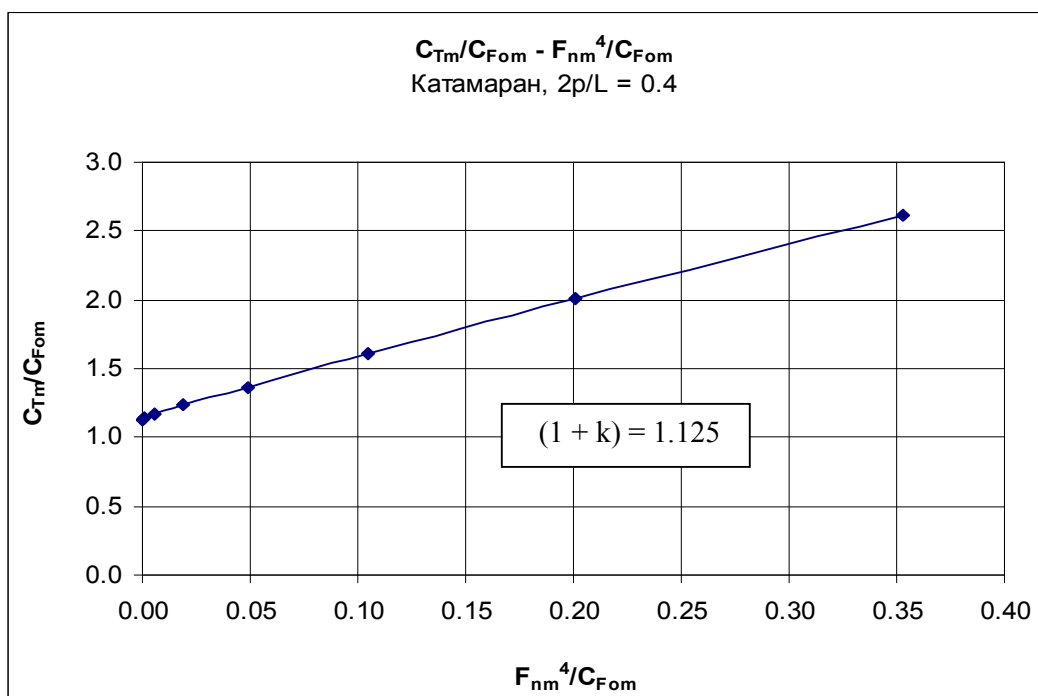


Рис. 2.5 – График C_{Tm}/C_{Fom} в зависимости от F_{nm}^4/C_{Fom} для форм-фактора $(1+k)$ ($2p/L = 0.4$, Корпус Виглея 1)

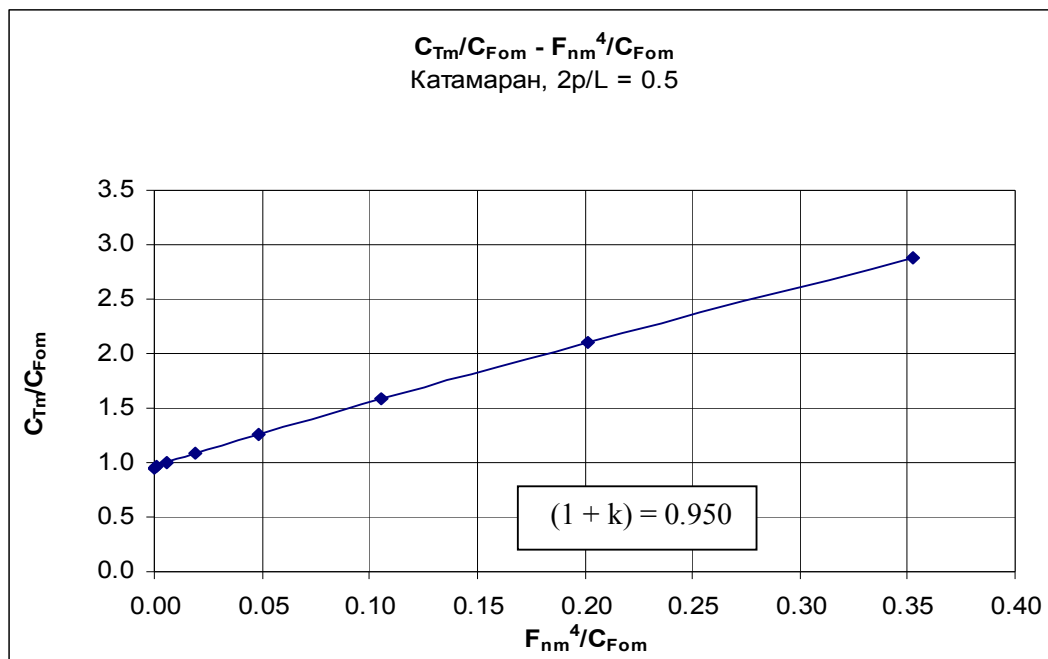


Рис. 2.6 – График C_{Tm}/C_{Fom} от F_{nm}^4/C_{Fom} для форм-фактора $(1+k)$
($2p/L = 0.5$, Корпус Виглея 1)

Таблица 2.8 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления судна R_w [N],
(Исследование 1, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. Формула Ньюмена)

F_n	МКК, усоверш. Формула Ньюмена R_w [N]		
	$2p/L=0.3$	$2p/L=0.4$	$2p/L=0.5$
0.30	1.150	1.093	1.297
0.40	4.883	4.908	5.593
0.50	13.031	13.563	12.976
0.60	14.139	13.507	15.715
0.70	14.713	15.464	18.785
0.80	16.646	19.354	22.808
0.90	21.093	26.273	28.388
1.00	28.405	31.574	31.599

Таблица 2.9 – Различие в процентах между теоретическими и экспериментальными значениями C_w (Исследование 1, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. Формула Ньюмена)

F_n	Различие в процентах (%) между теоретическими (МКК, усоверш. формула Ньюмена) и экспериментальными значениями C_w		
	$2p/L = 0.3$	$2p/L = 0.4$	$2p/L = 0.5$
0.30	4.769	5.127	4.854
0.40	4.890	4.679	4.825
0.50	4.686	5.159	4.897
0.60	4.645	4.944	4.924
0.70	4.702	4.896	4.969
0.80	4.978	4.942	4.892
0.90	4.766	4.839	4.952
1.00	4.661	4.727	4.960

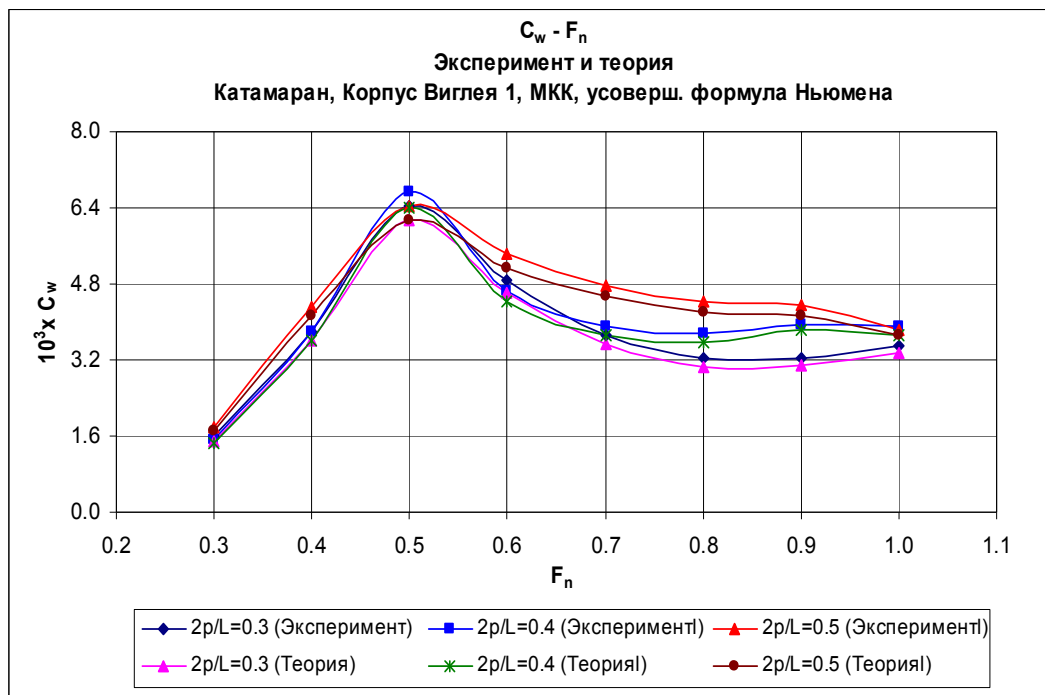


Рис. 2.7 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w
 Исследование 1, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Ньюмена

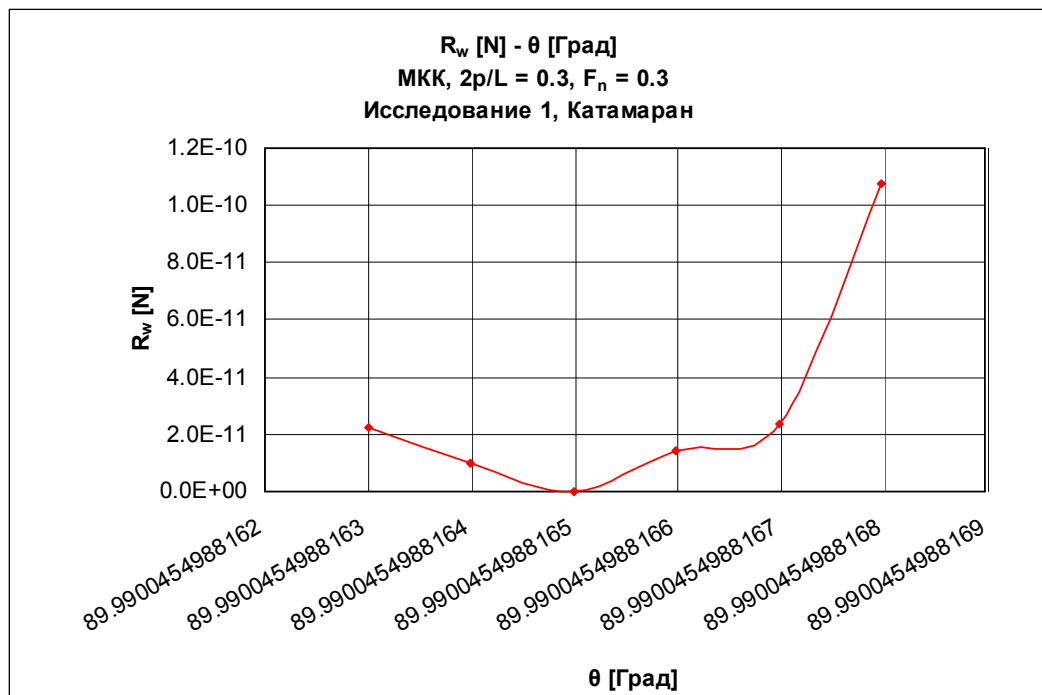


Рис. 2.8 – Характерная функция формы $R_w [N]$, Исследование 1,
 Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. Формула Ньюмена, $F_n = 0.3$, $2p/L = 0.3$

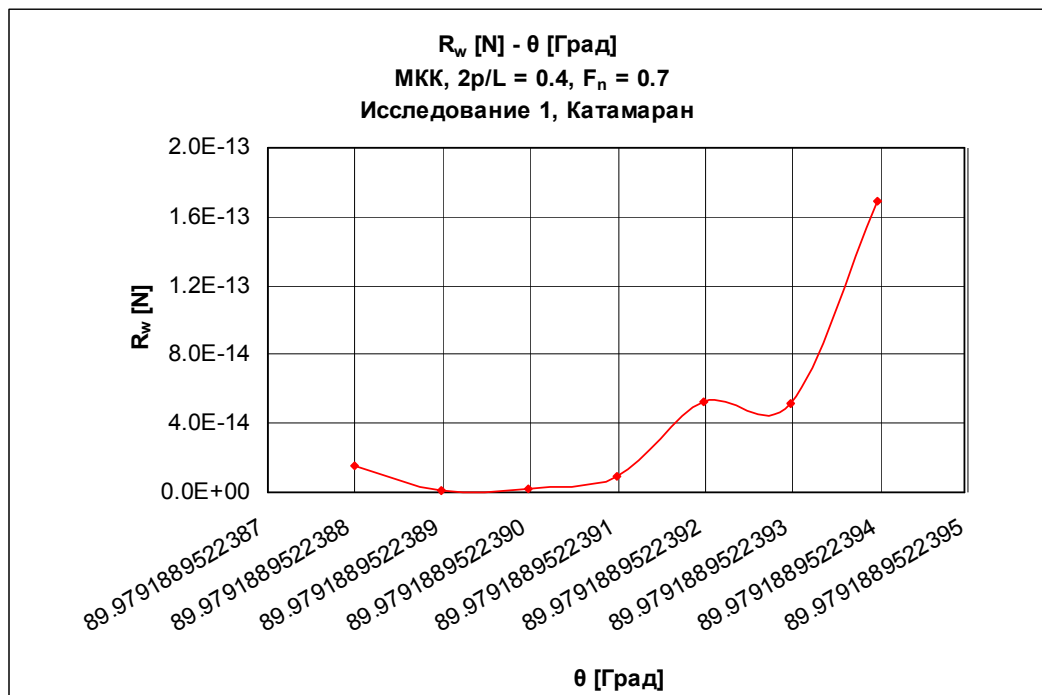


Рис. 2.9 – Характерная функция формы R_w [N], Исследование 1, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. Метод Ньюмена $F_n = 0.7$, $2p/L = 0.4$

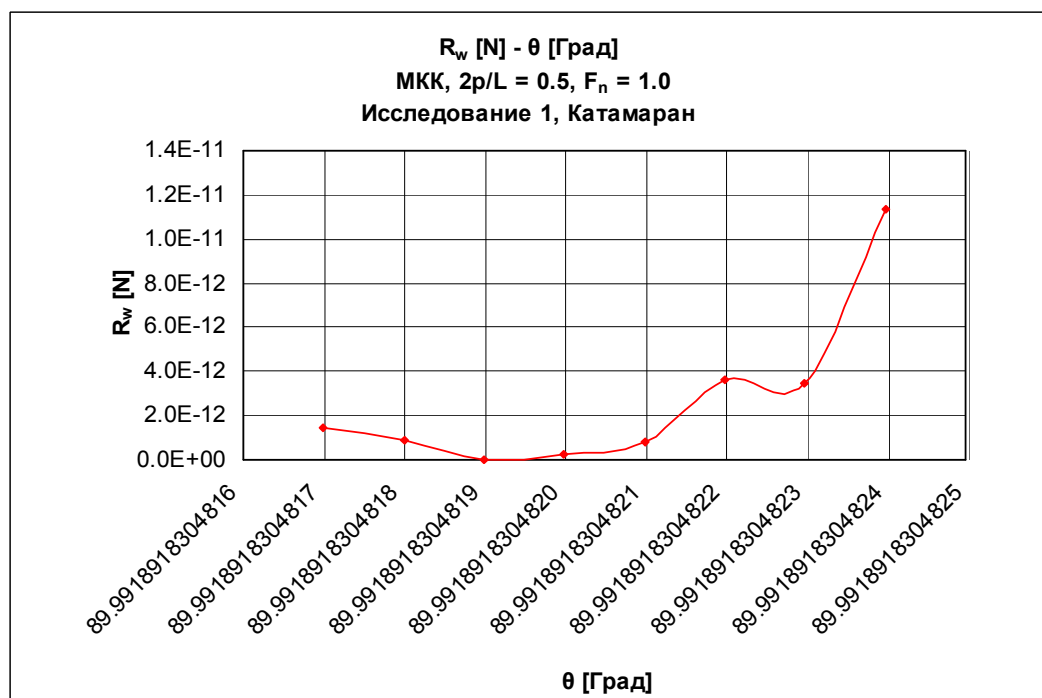


Рис. 2.10 – Характерная функция формы R_w [N], Исследование 1, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Ньюмена $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

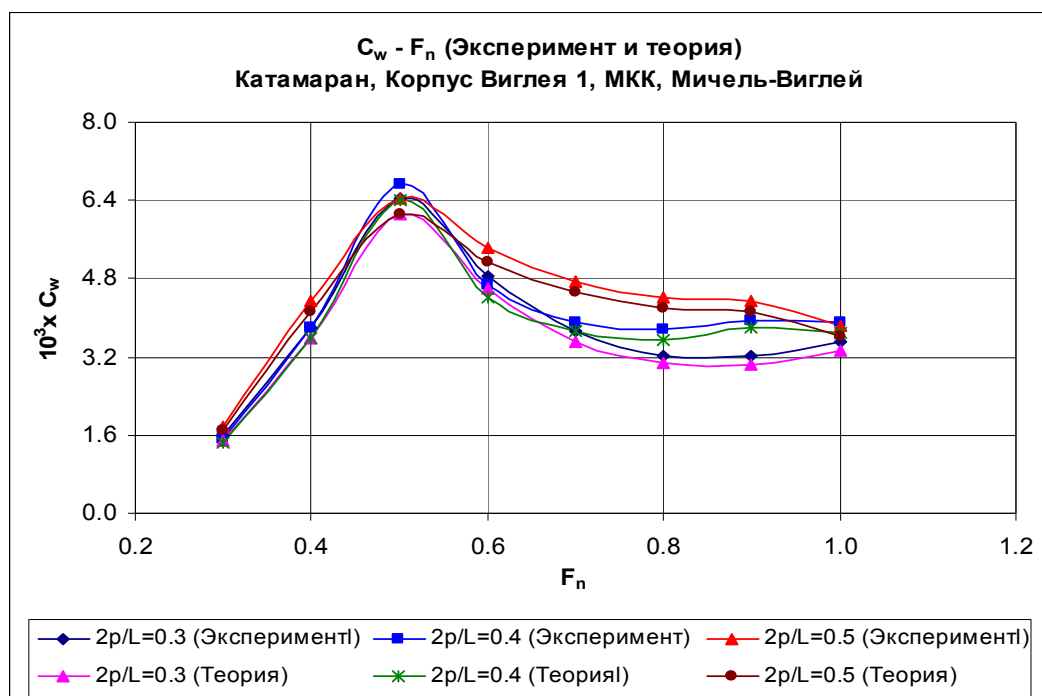


Рис. 2.11 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w (Исследования 2, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея)

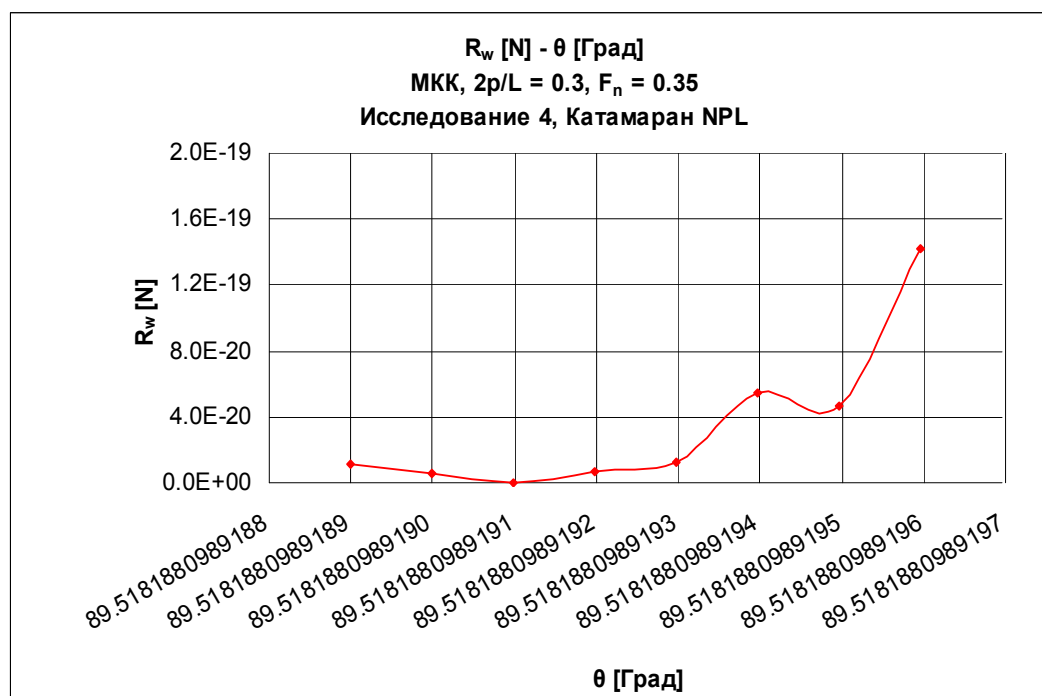


Рис. 2.12 – Характерная функция формы $R_w [N]$, Исследование 2, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.3$

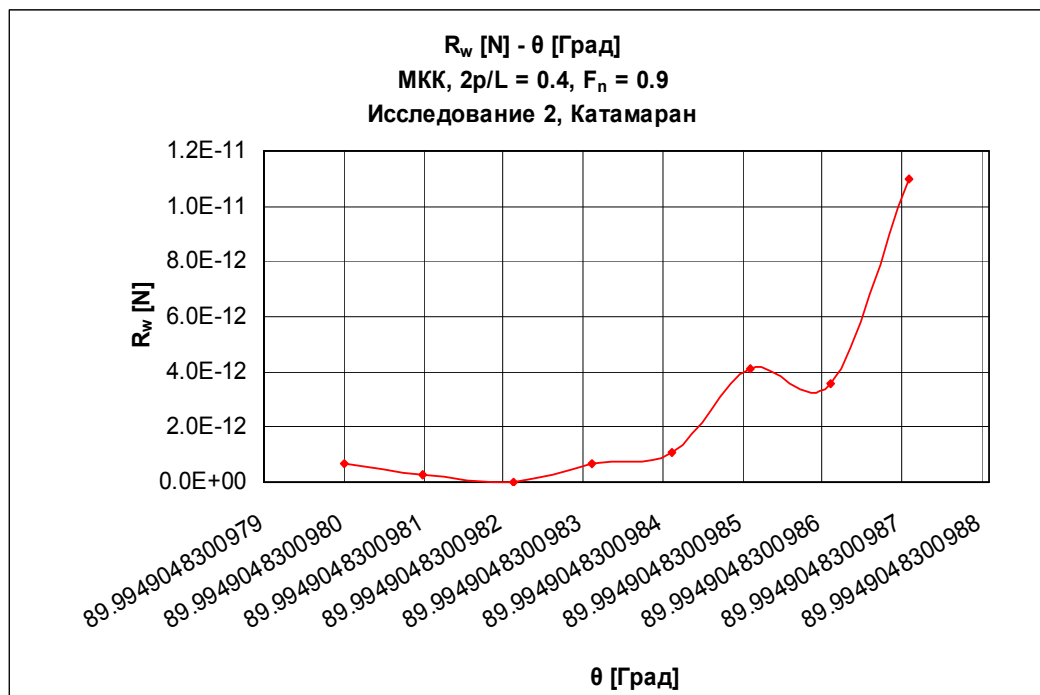


Рис. 2.13 – Характерная функция формы R_w [N] Исследование 2, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея $F_n = 0.9$, $2p/L = 0.4$

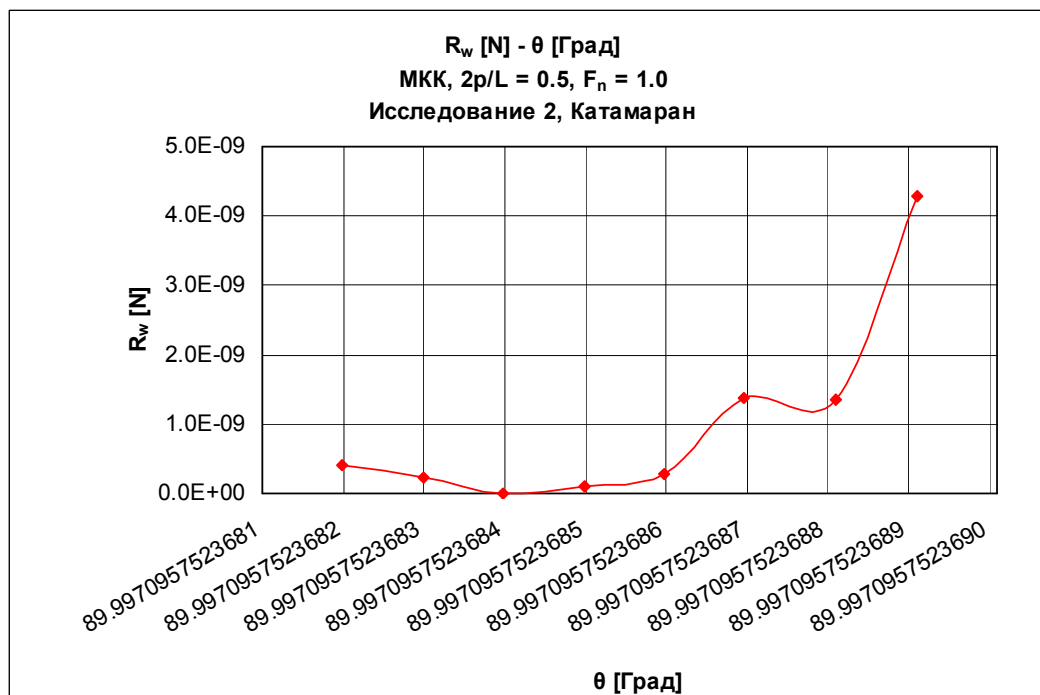


Рис. 2.14 – Характерная функция формы R_w [N], Исследование 2, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

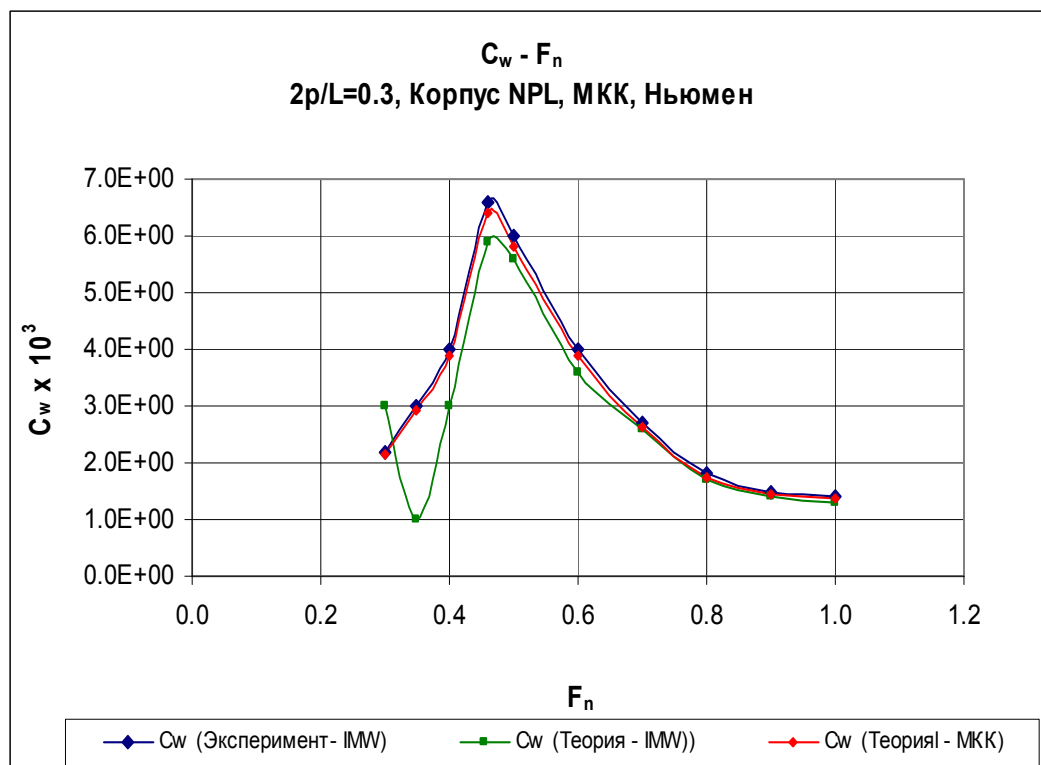


Рис. 2.15 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w в функции F_n , Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $2p/L = 0.3$

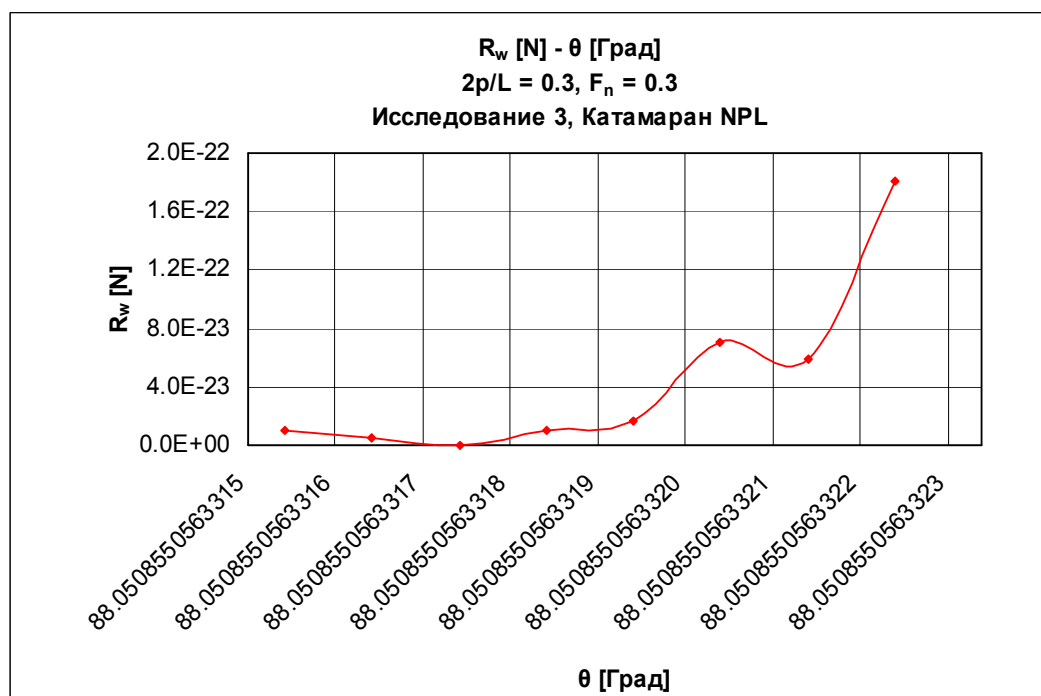


Рис. 2.16 – Типовая функция формы R_w [N], Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.3$, $2p/L = 0.3$

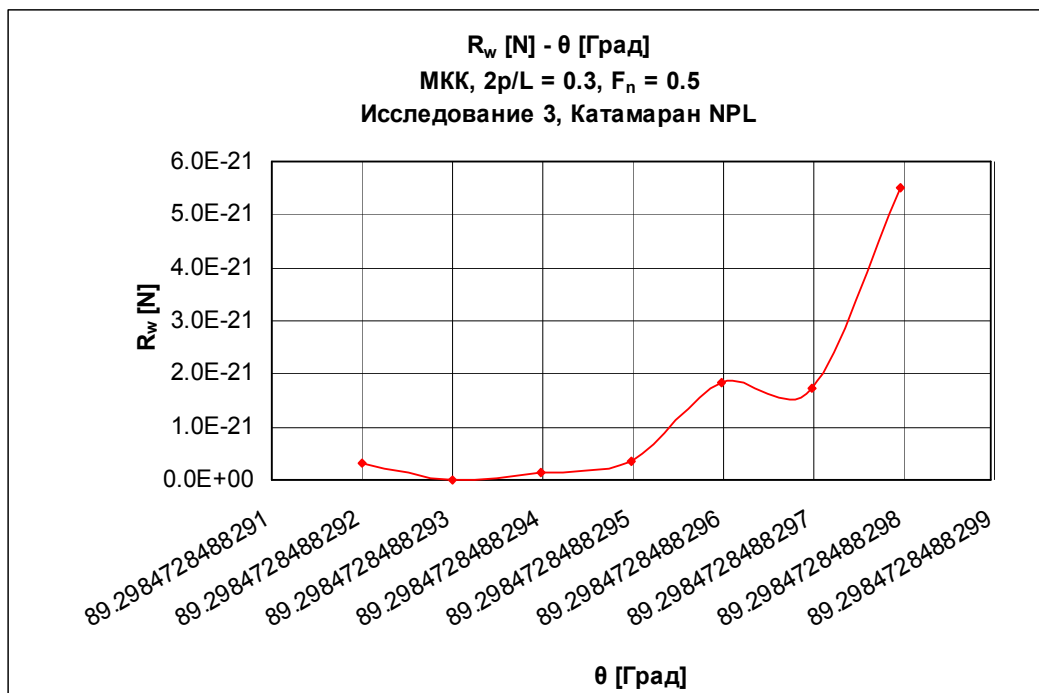


Рис. 2.17 – Характерная функция формы R_w [N], Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. метод Ньюмена, $F_n = 0.5$, $2p/L = 0.3$

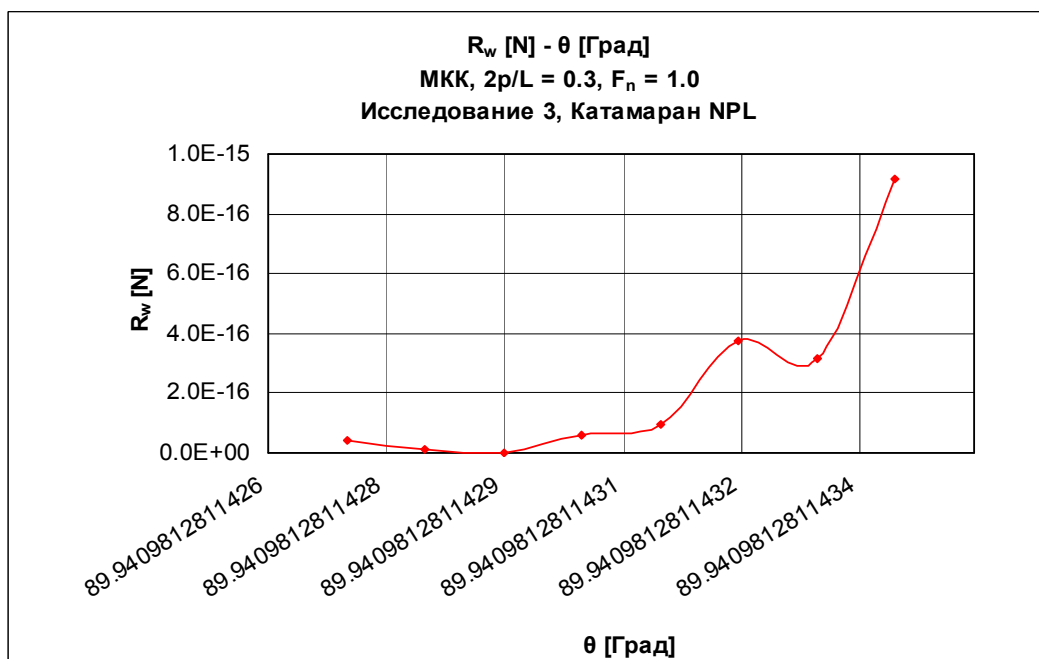


Рис. 2.18 – Характерная функция формы R_w [N], Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.3$

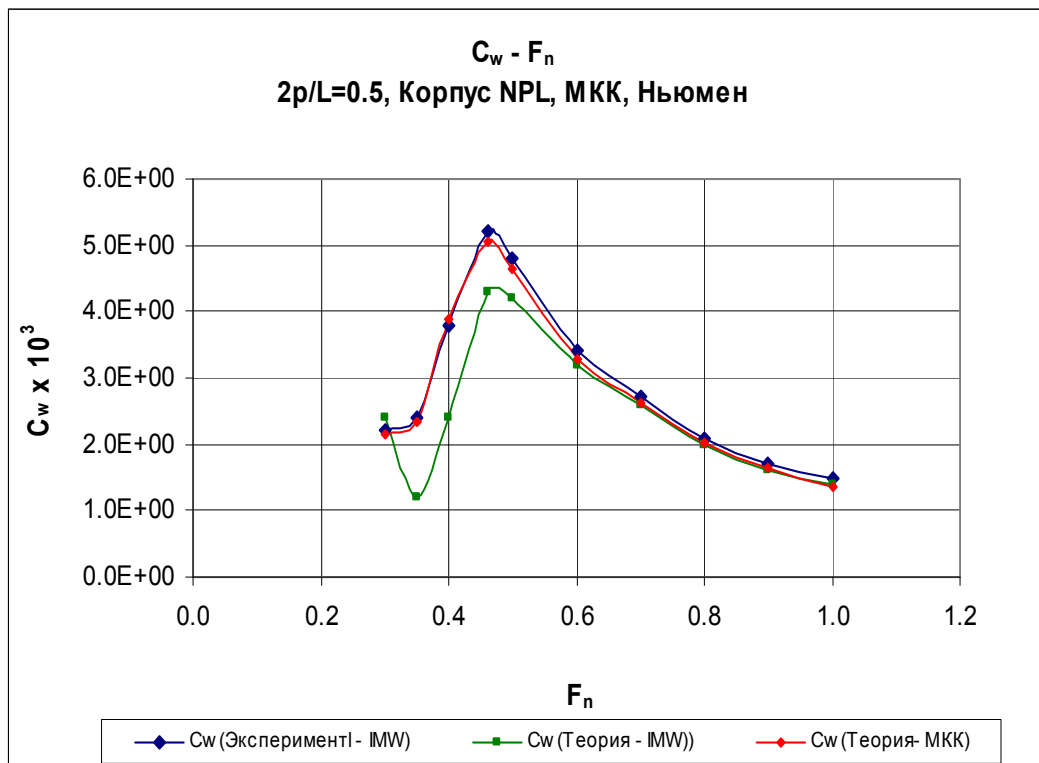


Рис. 2.19 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w от F_n
Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $2p/L = 0.5$

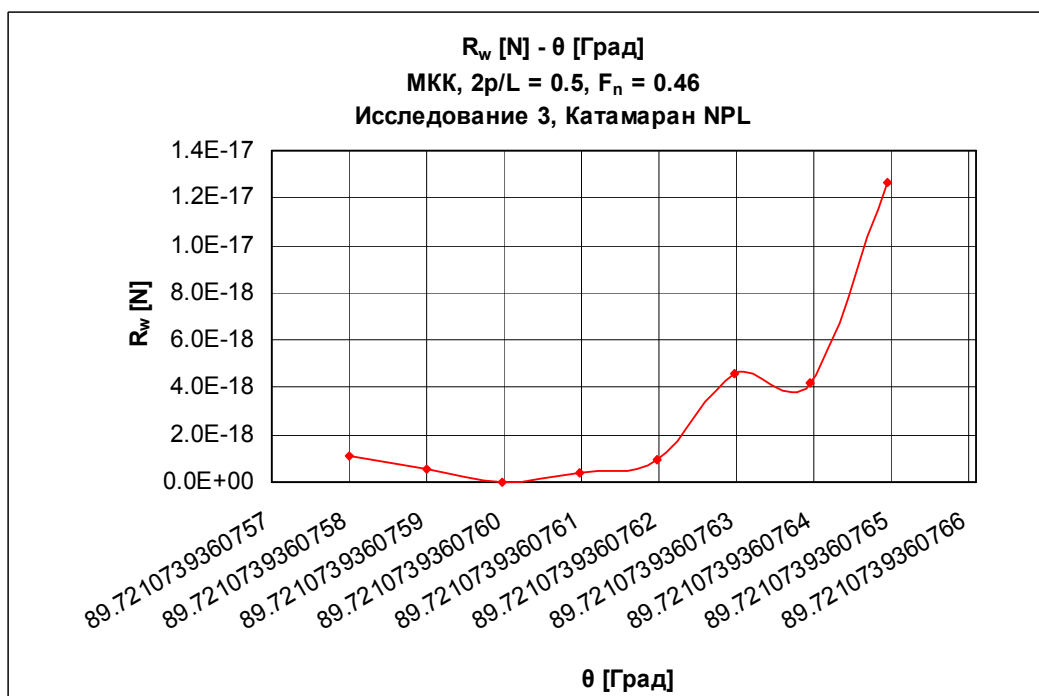


Рис. 2.20 – Характерная функция формы $R_w [N]$, Исследование 3,
Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.46$, $2p/L = 0.5$

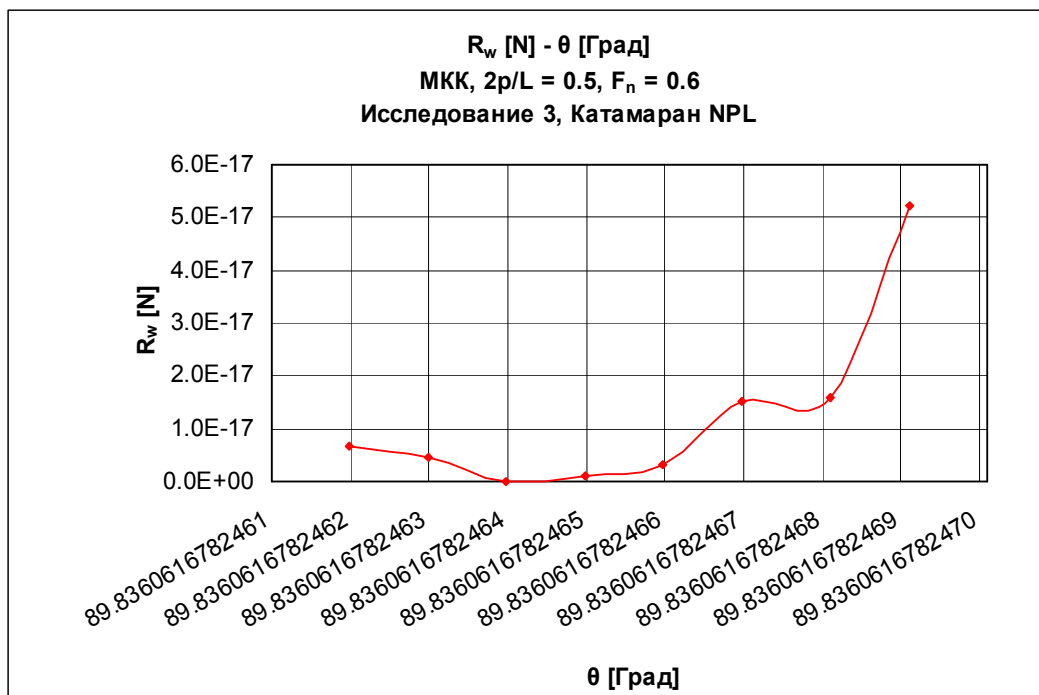


Рис. 2.21 – Характерная функция формы R_w [N], Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.6$, $2p/L = 0.5$

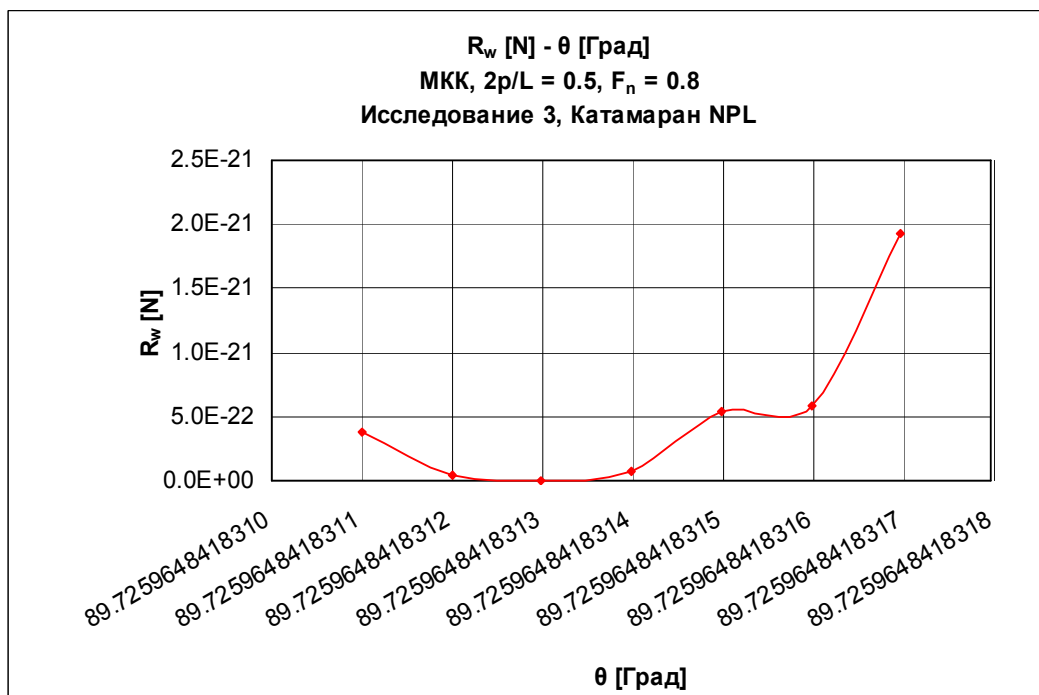


Рис. 2.22 – Характерная функция формы R_w [N], Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. Формула Ньюмена, $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.5$

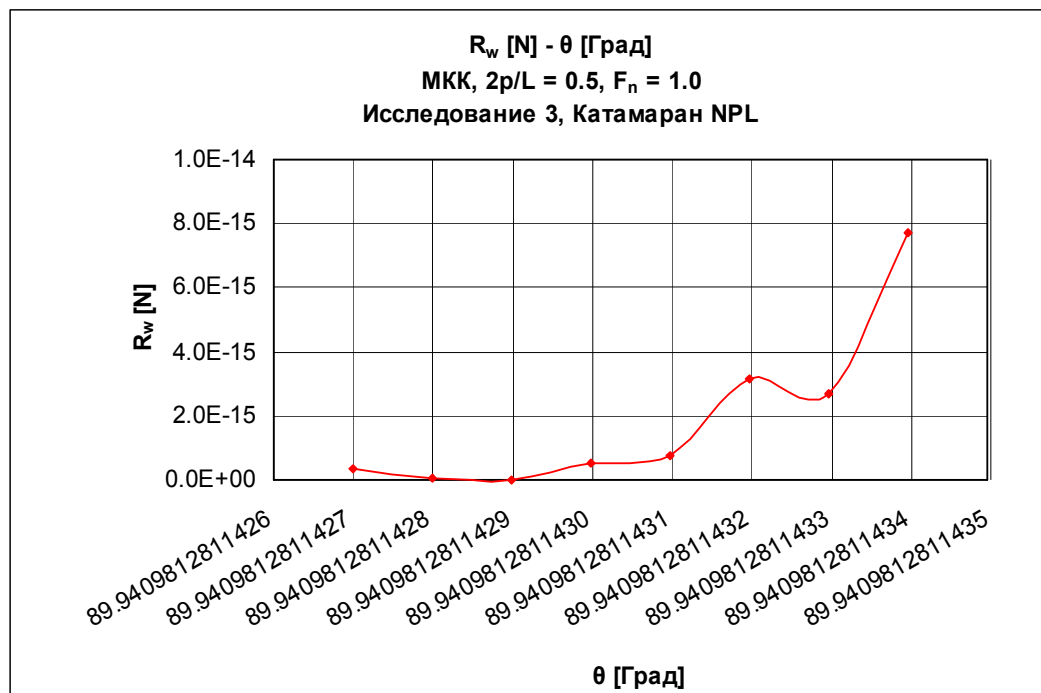


Рис. 2.23 – Характерная функция формы R_w [N], Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

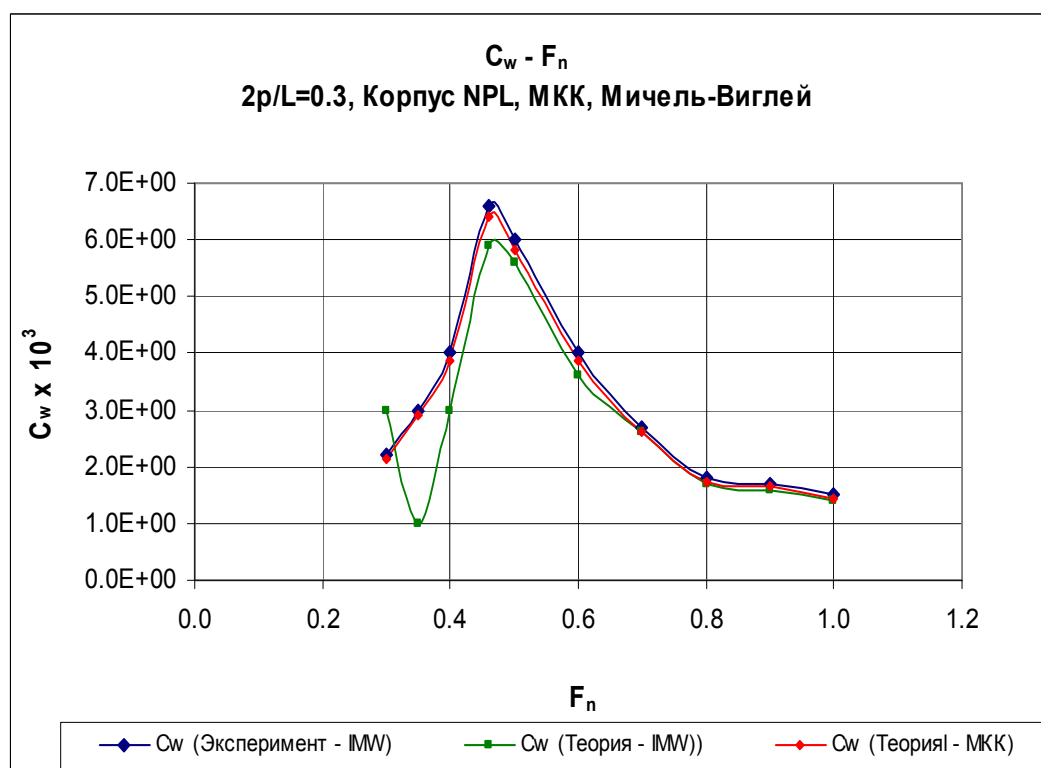


Рис. 2.24 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w от F_n (Исследование 4, корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $2p/L = 0.3$)

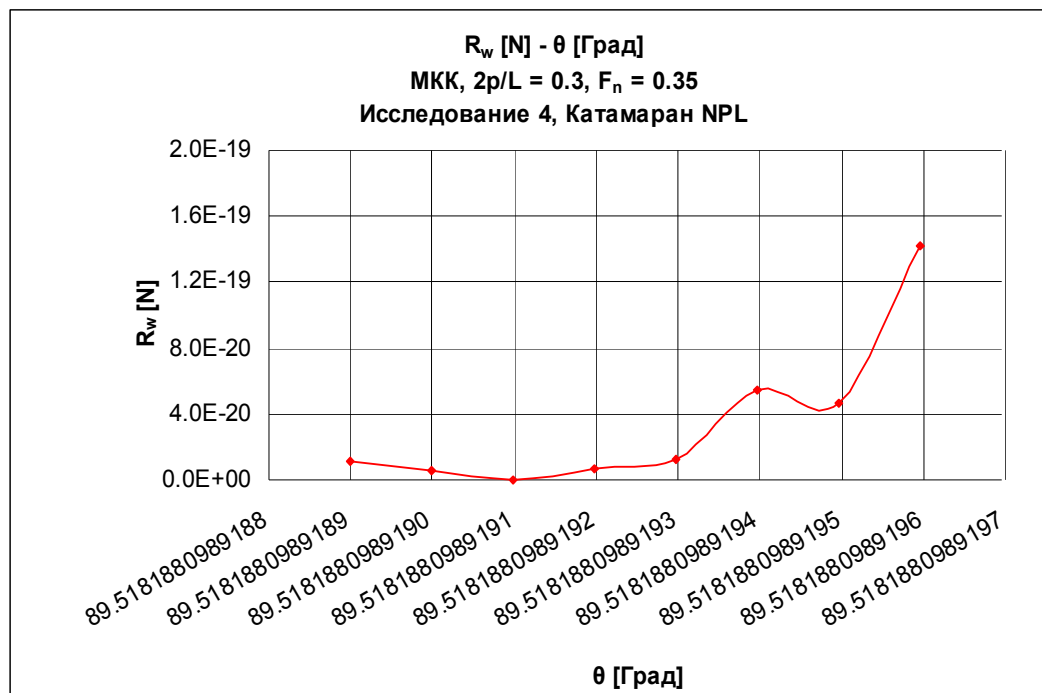


Рис. 2.25 – Функция формы R_w [N], Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.35$, $2p/L = 0.3$

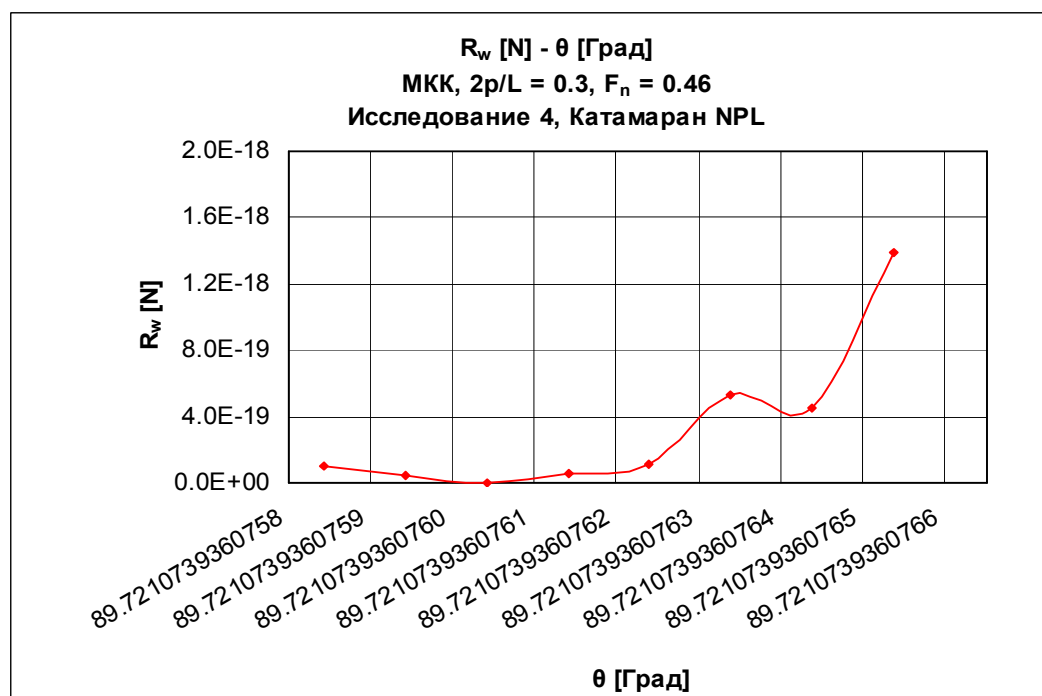


Рис. 2.26 – Характерная функция формы R_w [N], Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.46$, $2p/L = 0.3$)

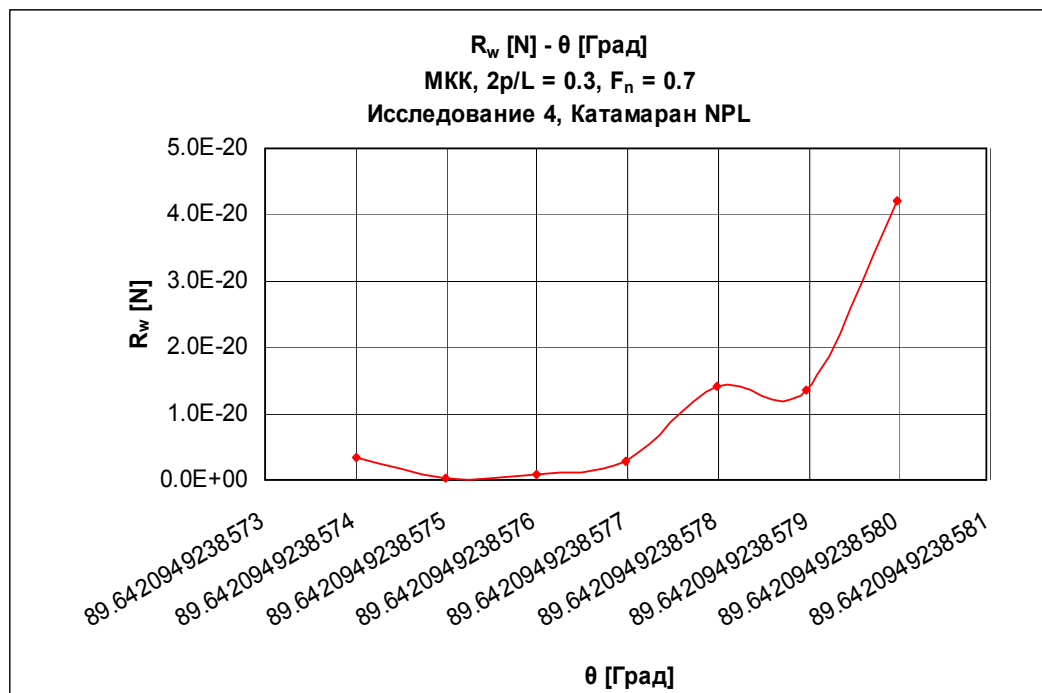


Рис. 2.27 – Характерная функция формы R_w [N], Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.7$, $2p/L = 0.3$

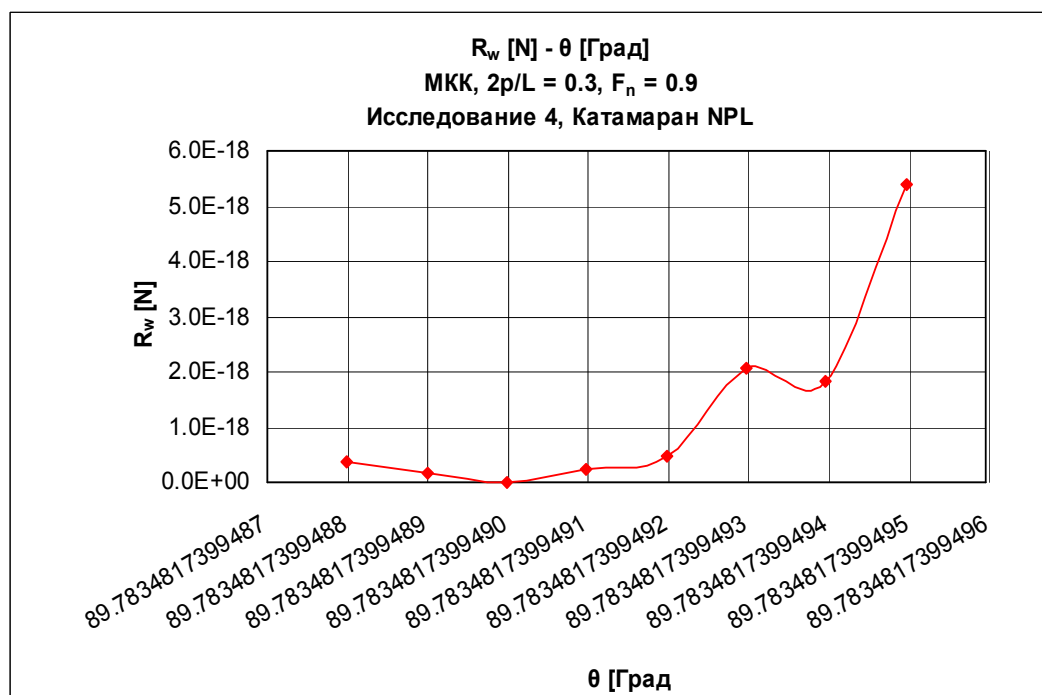


Рис. 2.28 – Характерная функция формы R_w [N], Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.9$, $2p/L = 0.3$

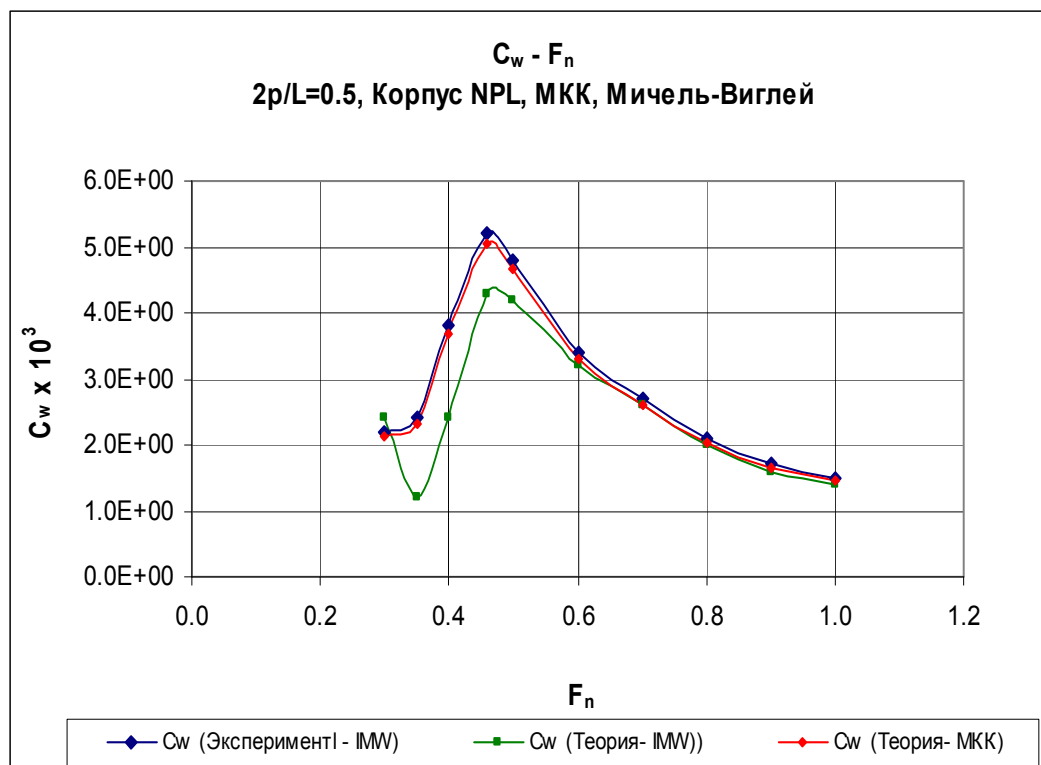


Рис. 2.29 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w от F_n Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея в сравнении с данными Инсела-Молланда-Велликома, $2p/L = 0.5$

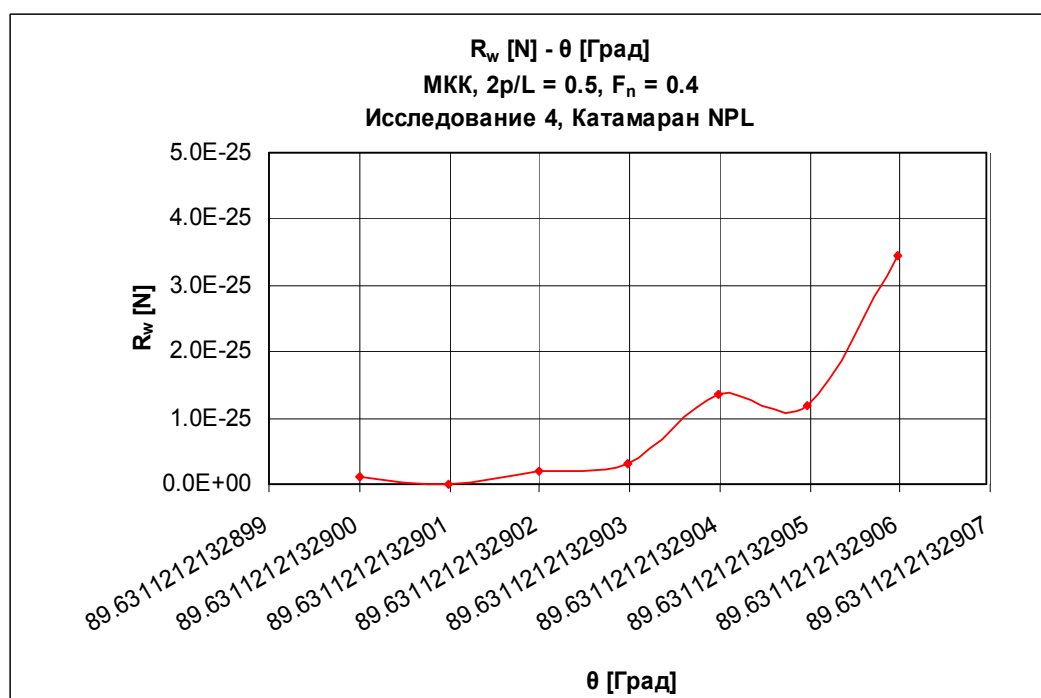


Рис. 2.30 – Характерная функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.4$, $2p/L = 0.5$

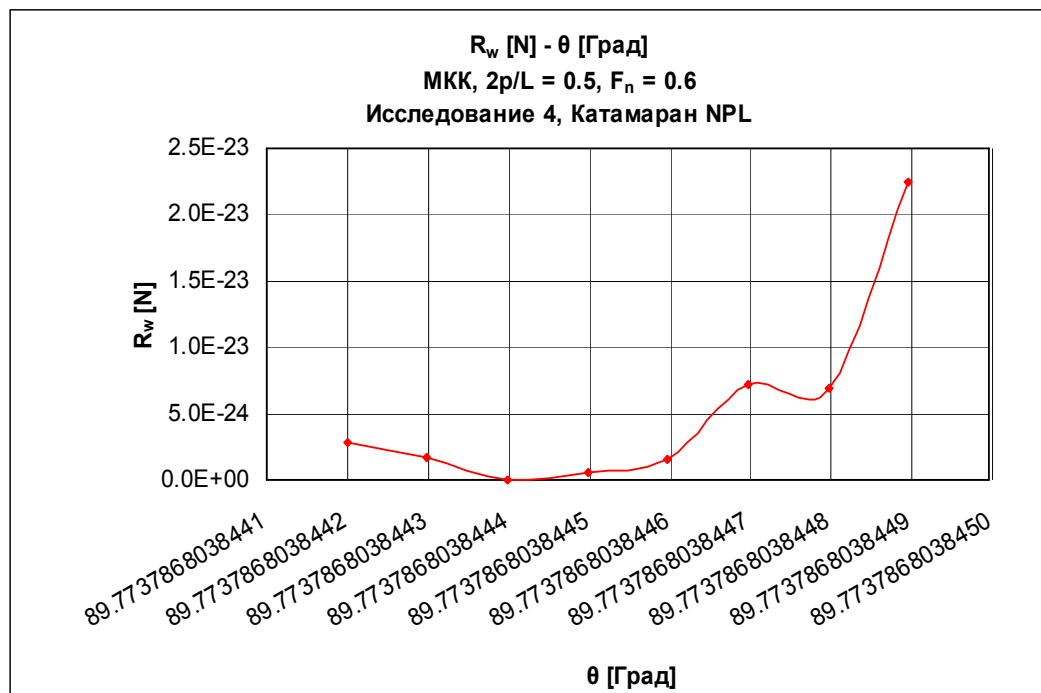


Рис. 2.31 – Характерная функция формы R_w [N], Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.6$, $2p/L = 0.5$

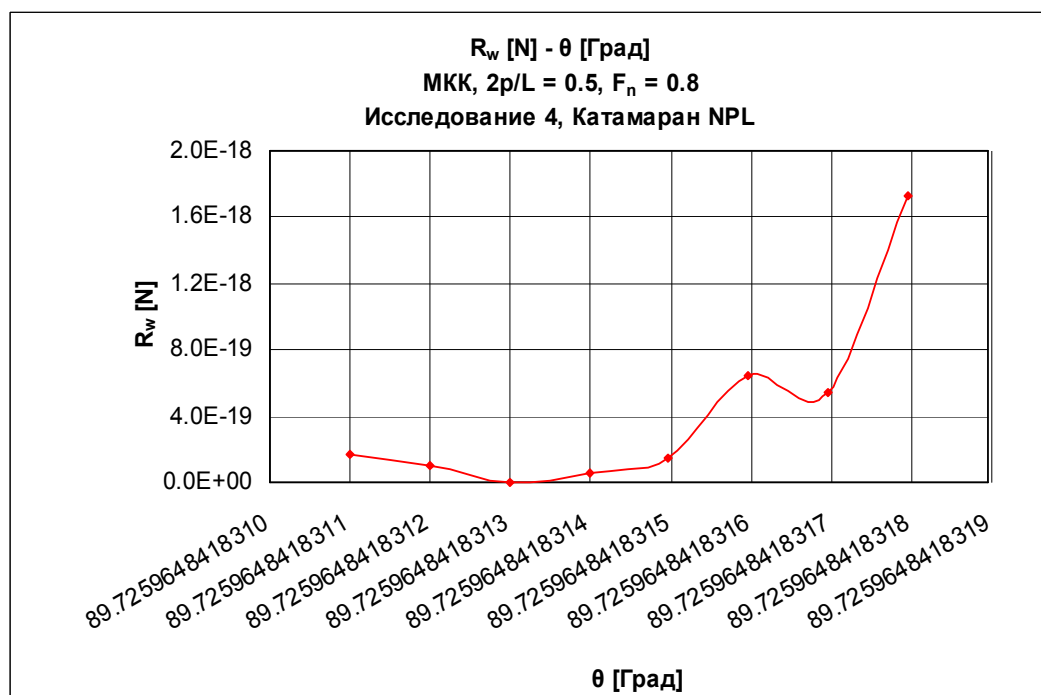


Рис. 2.32 – Характерная функция формы R_w [N], Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.5$

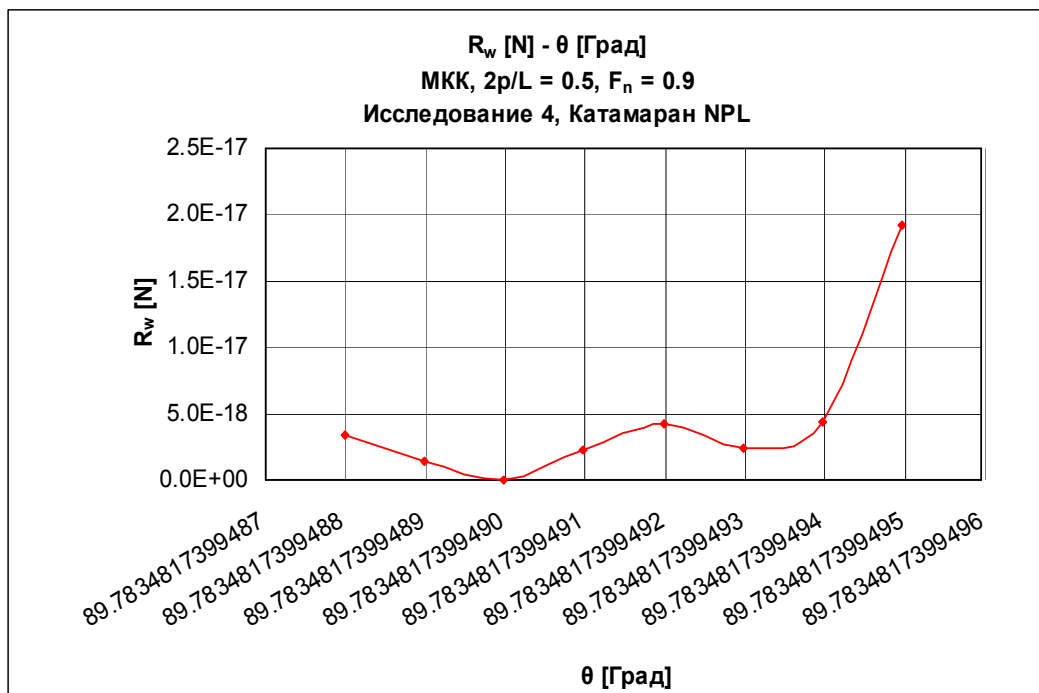


Рис. 2.33 – Характерные функции формы R_w [N], Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.9$, $2p/L = 0.5$

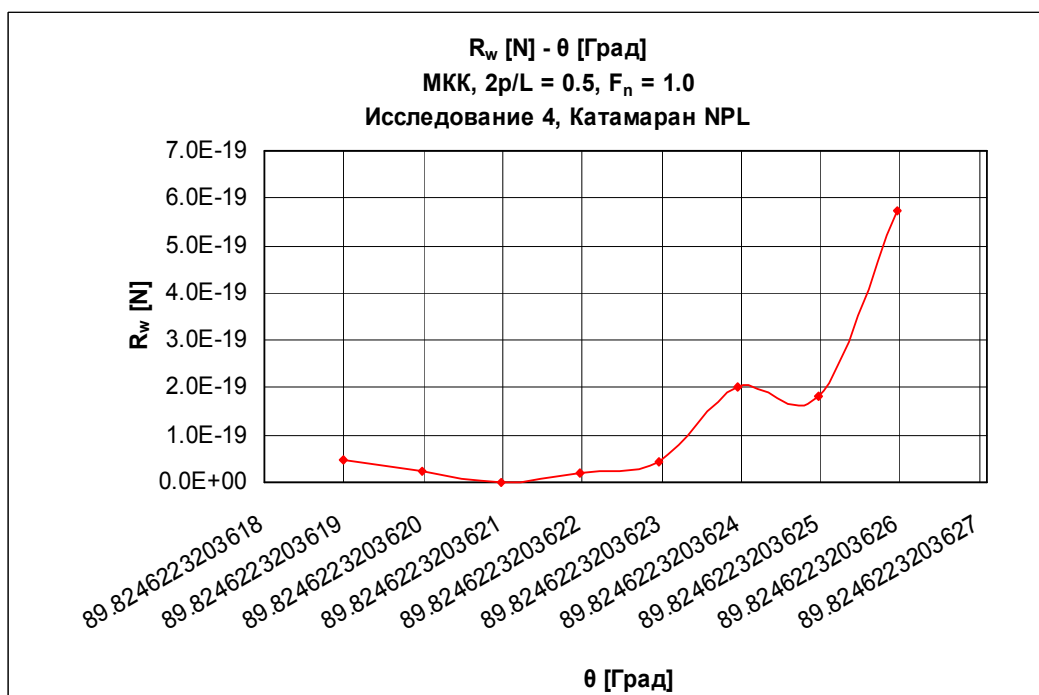


Рис. 2.34 – Характерная функция формы R_w [N], Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.10 - Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9900454988165$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 1, Катамаран, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. Формула Ньюмена, $F_n = 0.3$, $2p/L = 0.3$

MC	I^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	$R_w [N]$
1	6.394713510E-24	89.9900454988161	9.999999849E-01	3.018517764E-08	1.906818672E+11	5.773121791E-02	4.664650187E-11
4	3.543423474E-24	89.9900454988162	9.999999849E-01	3.018517764E-08	1.906818672E+11	5.775002140E-02	1.034242707E-10
2	1.526010230E-24	89.9900454988163	9.999999849E-01	3.018517764E-08	1.906818672E+11	5.776882781E-02	2.227759296E-11
4	3.463096885E-25	89.9900454988164	9.999999849E-01	3.018517764E-08	1.906818672E+11	5.778763756E-02	1.011455643E-11
2	3.455392143E-27	89.9900454988165	9.999999849E-01	3.018517763E-08	1.906818672E+11	5.780644999E-02	5.047669425E-14
4	4.996637499E-25	89.9900454988166	9.999999849E-01	3.018517763E-08	1.906818672E+11	5.782526544E-02	1.460302195E-11
1	1.619723357E-24	89.9900454988167	9.999999849E-01	3.018517763E-08	1.906818673E+11	5.784173164E-02	2.367551286E-11

Таблица 2.11 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9791889522389$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 1, Катамаран, Корпус Виглея 1, Конечный корень, усоверш. Формула Ньюмена, $F_n = 0.7$, $2p/L = 0.4$

MC	I^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	$R_w [N]$
1	1.704992173E-26	89.9791889522383	9.999999340E-01	1.319297100E-07	2.086825275E+10	1.873660763E+00	8.113789600E-14
4	1.259665984E-26	89.9791889522384	9.999999340E-01	1.319297100E-07	2.086825275E+10	1.873662607E+00	2.397823283E-13
2	8.329958233E-27	89.9791889522385	9.999999340E-01	1.319297100E-07	2.086825275E+10	1.873664716E+00	7.928208957E-14
4	4.954919660E-27	89.9791889522386	9.999999340E-01	1.319297100E-07	2.086825275E+10	1.873666824E+00	9.431903868E-14
2	2.453738061E-27	89.9791889522387	9.999999340E-01	1.319297100E-07	2.086825275E+10	1.873668933E+00	2.335400888E-14
4	8.140846801E-28	89.9791889522388	9.999999340E-01	1.319297100E-07	2.086825275E+10	1.873671041E+00	1.549648884E-14
2	1.063072513E-28	89.9791889522389	9.999999340E-01	1.319297100E-07	2.086825275E+10	1.873672886E+00	1.011805526E-15
4	1.129669605E-28	89.9791889522390	9.999999340E-01	1.319297100E-07	2.086825275E+10	1.873674994E+00	2.150384328E-15
1	9.972356332E-28	89.9791889522391	9.999999340E-01	1.319297100E-07	2.086825275E+10	1.873677103E+00	9.491457853E-15

Таблица 2.12 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9918918304819$ и функция формы R_w [N], Исследование 1, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

MC	I^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIFT	R_w [N]
1	1.822234247E-25	89.9918918304813	9.999999900E-01	2.002628407E-08	3.528575722E+11	1.389050733E+00	5.326502514E-12
4	1.229242637E-25	89.9918918304814	9.999999900E-01	2.002628407E-08	3.528575722E+11	1.389027296E+00	1.437236410E-11
2	7.995943230E-26	89.9918918304815	9.999999900E-01	2.002628407E-08	3.528575722E+11	1.389006462E+00	4.674377552E-12
4	4.615213361E-26	89.9918918304816	9.999999900E-01	2.002628407E-08	3.528575722E+11	1.388985629E+00	5.395967814E-12
2	2.416945216E-26	89.9918918304817	9.999999900E-01	2.002628407E-08	3.528575722E+11	1.388967399E+00	1.412891064E-12
4	7.666824660E-27	89.9918918304818	9.999999900E-01	2.002628407E-08	3.528575722E+11	1.388946566E+00	8.963567320E-13
2	3.908906203E-28	89.9918918304819	9.999999900E-01	2.002628406E-08	3.528575723E+11	1.388925733E+00	2.284988891E-14
4	2.322818967E-27	89.9918918304820	9.999999900E-01	2.002628406E-08	3.528575723E+11	1.388904900E+00	2.715611810E-13
2	1.349289245E-26	89.9918918304821	9.999999900E-01	2.002628406E-08	3.528575723E+11	1.388884067E+00	7.887164046E-13
4	3.080762696E-26	89.9918918304822	9.999999900E-01	2.002628406E-08	3.528575723E+11	1.388865838E+00	3.601623884E-12
2	5.923246730E-26	89.9918918304823	9.999999900E-01	2.002628406E-08	3.528575723E+11	1.388845005E+00	3.462289861E-12
4	9.690294331E-26	89.9918918304824	9.999999900E-01	2.002628406E-08	3.528575723E+11	1.388824172E+00	1.132828196E-11
1	1.437412323E-25	89.9918918304825	9.999999900E-01	2.002628406E-08	3.528575723E+11	1.388803339E+00	4.200896093E-12

Таблица 2.13 – Теоретическое значение коэффициента волнового сопротивления C_w ,
Исследование 2, Корпус Виглея 1, МКК, усовершенств. формула Мичеля-Виглея

F_n	МКК, усовершенств. формула Мичеля-Виглея $10^3 \times C_w$		
	$2p/L=0.3$	$2p/L=0.4$	$2p/L=0.5$
0.30	1.5011	1.4324	1.6938
0.40	3.5900	3.6009	4.1101
0.50	6.1195	6.3978	6.1038
0.60	4.6054	4.4172	5.1355
0.70	3.5215	3.7109	4.5152
0.80	3.0625	3.5578	4.1973
0.90	3.0578	3.8132	4.1224
1.00	3.3324	3.7046	3.6338

Таблица 2.14 – Теоретическое значение волнового сопротивления R_w [Н],
Исследование 2, Корпус Виглея 1, МКК, усовершенств. формула Мичеля-Виглея

F_n	МКК, усовершенств. формула Мичеля-Виглея R_w [Н]		
	$2p/L=0.3$	$2p/L=0.4$	$2p/L=0.5$
0.30	1.146	1.093	1.293
0.40	4.871	4.886	5.577
0.50	12.973	13.563	12.940
0.60	14.059	13.485	15.678
0.70	14.632	15.419	18.762
0.80	16.621	19.309	22.780
0.90	21.003	26.192	28.316
1.00	28.258	31.415	30.815

Таблица 2.15 – Различия в процентах теоретических и экспериментальных значений C_w ,
Исследование 2, Корпус Виглея 1, МКК, усовершенств. формула Мичеля-Виглея

F_n	Различия (%) между теоретическими и экспериментальными значениями R_w		
	$2p/L = 0.3$	$2p/L = 0.4$	$2p/L = 0.5$
0.30	5.135	5.141	5.137
0.40	5.123	5.114	5.099
0.50	5.110	5.158	5.163
0.60	5.183	5.101	5.151
0.70	5.227	5.172	5.088
0.80	5.119	5.166	5.010
0.90	5.170	5.130	5.194
1.00	5.154	5.209	5.225

Таблица 2.16 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9893458045552$ и функция формы R_w [N], Исследование 2, Катамаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.3$

MC	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	R_w [N]
1	6.399045426E-26	89.9893458045548	9.999999827E-01	3.457769578E-08	1.555270471E+11	1.878417777E+00	3.239004959E-13
4	3.718722059E-26	89.9893458045549	9.999999827E-01	3.457769578E-08	1.555270471E+11	1.878426802E+00	3.764629332E-13
2	1.760720973E-26	89.9893458045550	9.999999827E-01	3.457769578E-08	1.555270472E+11	1.878435826E+00	8.912327352E-14
4	5.267093782E-27	89.9893458045551	9.999999827E-01	3.457769578E-08	1.555270472E+11	1.878444850E+00	5.332166792E-14
2	1.546764584E-28	89.9893458045552	9.999999827E-01	3.457769578E-08	1.555270472E+11	1.878453874E+00	7.829409077E-16
4	2.274639373E-27	89.9893458045553	9.999999827E-01	3.457769578E-08	1.555270472E+11	1.878462899E+00	2.302763832E-14
2	1.006028866E-26	89.9893458045554	9.999999827E-01	3.457769578E-08	1.555270472E+11	1.878470795E+00	5.092360249E-14
4	2.574073018E-26	89.9893458045555	9.999999827E-01	3.457769578E-08	1.555270472E+11	1.878479819E+00	2.605923256E-13
1	4.864866338E-26	89.9893458045556	9.999999827E-01	3.457769578E-08	1.555270472E+11	1.878488843E+00	2.462542659E-13

Таблица 2.17 - Характерный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9949048300982$ и функция формы R_w [N], Исследование 2, Катамаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.9$, $2p/L = 0.4$

MC	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	R_w [N]
1	1.399894714E-24	89.9949048300976	9.999999960E-01	7.908098589E-09	1.421974759E+12	2.440796679E-01	3.326067057E-12
4	9.514656342E-25	89.9949048300977	9.999999960E-01	7.908098589E-09	1.421974759E+12	2.440379799E-01	9.040959892E-12
2	5.893587396E-25	89.9949048300978	9.999999960E-01	7.908098589E-09	1.421974759E+12	2.439962951E-01	2.799606409E-12
4	3.433155032E-25	89.9949048300979	9.999999960E-01	7.908098589E-09	1.421974760E+12	2.439598239E-01	3.261187292E-12
2	1.430276713E-25	89.9949048300980	9.999999960E-01	7.908098588E-09	1.421974760E+12	2.439181454E-01	6.792008116E-13
4	2.905679614E-26	89.9949048300981	9.999999960E-01	7.908098588E-09	1.421974760E+12	2.438764703E-01	2.759190219E-13
2	4.001458743E-27	89.9949048300982	9.999999960E-01	7.908098588E-09	1.421974760E+12	2.438295898E-01	1.899497693E-14
4	7.342815109E-26	89.9949048300983	9.999999960E-01	7.908098587E-09	1.421974760E+12	2.437879217E-01	6.970096528E-13
1	2.291785891E-25	89.9949048300984	9.999999960E-01	7.908098587E-09	1.421974760E+12	2.437462569E-01	1.087541944E-12

Таблица 2.18 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9970957523684$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 2, Катамаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

MC	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_r	$R_w [N]$
1	1.002056210E-23	89.9970957523678	9.999999987E-01	2.569342630E-09	7.678333405E+12	3.935920009E+00	1.679011207E-09
4	7.009880336E-24	89.9970957523679	9.999999987E-01	2.569342630E-09	7.678333406E+12	3.936039507E+00	4.698349201E-09
2	4.535702868E-24	89.9970957523680	9.999999987E-01	2.569342630E-09	7.678333407E+12	3.936158895E+00	1.520066058E-09
4	2.597942192E-24	89.9970957523681	9.999999987E-01	2.569342630E-09	7.678333407E+12	3.936278173E+00	1.741367779E-09
2	1.196614098E-24	89.9970957523682	9.999999987E-01	2.569342630E-09	7.678333408E+12	3.936397342E+00	4.010497858E-10
4	3.317732566E-25	89.9970957523683	9.999999987E-01	2.569342629E-09	7.678333409E+12	3.936516401E+00	2.223968748E-10
2	1.509354401E-26	89.9970957523684	9.999999987E-01	2.569342629E-09	7.678333410E+12	3.936620487E+00	5.058945692E-12
4	1.560785530E-25	89.9970957523685	9.999999987E-01	2.569342629E-09	7.678333410E+12	3.936739340E+00	1.046297360E-10
2	8.334942572E-25	89.9970957523686	9.999999987E-01	2.569342629E-09	7.678333411E+12	3.936858084E+00	2.793814810E-10
4	2.047387490E-24	89.9970957523687	9.999999987E-01	2.569342629E-09	7.678333412E+12	3.936976717E+00	1.372581469E-09
2	4.054216711E-24	89.9970957523688	9.999999987E-01	2.569342628E-09	7.678333413E+12	3.937110048E+00	1.359032234E-09
4	6.408030828E-24	89.9970957523689	9.999999987E-01	2.569342628E-09	7.678333414E+12	3.937228449E+00	4.296258916E-09
1	8.907621074E-24	89.9970957523690	9.999999987E-01	2.569342628E-09	7.678333415E+12	3.937331959E+00	1.493066029E-09

Таблица 2.19 – Теоретическое значение коэффициента C_w ,
Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $2p/L = 0.3$

F_n	Данные Инсела-Молланда-Велликома (IMW)		МКК Усоверш. Формула Ньюмена
	$C_w \times 10^3$ (Эксперимент)	$C_w \times 10^3$ (Теория)	$C_w \times 10^3$
0.30	2.200	3.000	2.132
0.35	3.000	1.000	2.909
0.40	4.000	3.000	3.875
0.46	6.600	5.900	6.398
0.50	6.000	5.600	5.812
0.60	4.000	3.600	3.873
0.70	2.700	2.600	2.616
0.80	1.800	1.700	1.744
0.90	1.500	1.400	1.453
1.00	1.400	1.300	1.356

Таблица 2.20 – Различие в процентах теоретических и экспериментальных значений,
 R_w [N], Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $2p/L = 0.3$

F_n	Данные Инсела-Молланда-Велликома (IMW)			МКК, усоверш. формула Ньюмена	
	R_w [N] (Эксперимент)	R_w [N] (Теория)	% различия	R_w [N]	% различия
0.30	1.047	1.427	-36.364	1.014	3.11
0.35	1.943	0.648	66.667	1.883	3.04
0.40	3.383	2.537	25.000	3.277	3.12
0.46	7.382	6.599	10.606	7.157	3.05
0.50	7.929	7.401	6.667	7.681	3.13
0.60	7.612	6.851	10.000	7.371	3.16
0.70	6.994	6.735	3.704	6.775	3.12
0.80	6.089	5.751	5.556	5.899	3.13
0.90	6.423	5.994	6.667	6.222	3.12
1.00	7.401	6.872	7.143	7.169	3.13

Таблица 2.21 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 88.0508550563317$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 3, Катамаран МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.3$, $2p/L = 0.3$

MC	I^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	$R_w [N]$
4	1.434397975E-31	88.0508550563314	9.994214097E-01	1.156845775E-03	2.541480623E+04	3.999977966E+00	5.209173891E-23
2	5.751969774E-32	88.0508550563315	9.994214097E-01	1.156845775E-03	2.541480623E+04	3.999977966E+00	1.044445520E-23
4	1.338972944E-32	88.0508550563316	9.994214097E-01	1.156845775E-03	2.541480623E+04	3.999977966E+00	4.862627402E-24
2	4.467596710E-34	88.0508550563317	9.994214097E-01	1.156845775E-03	2.541480623E+04	3.999977966E+00	8.112284228E-26
4	2.692577567E-32	88.0508550563318	9.994214097E-01	1.156845775E-03	2.541480623E+04	3.999977966E+00	9.778391360E-24
2	9.209273008E-32	88.0508550563319	9.994214097E-01	1.156845775E-03	2.541480623E+04	3.999977966E+00	1.672224353E-23
4	1.959122888E-31	88.0508550563320	9.994214097E-01	1.156845775E-03	2.541480623E+04	3.999977966E+00	7.114770083E-23
1	3.229243060E-31	88.0508550563321	9.994214097E-01	1.156845775E-03	2.541480623E+04	3.999977966E+00	5.863675539E-23

Таблица 2.22 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.2984728488293$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 3, Катамаран, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.5$, $2p/L = 0.3$

MC	I^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	$R_w [N]$
4	1.626531310E-30	89.2984728488290	9.999250437E-01	1.499070304E-04	5.448375087E+05	2.196505643E+00	2.644031474E-21
2	7.002975596E-31	89.2984728488291	9.999250437E-01	1.499070304E-04	5.448375087E+05	2.196505643E+00	5.691894084E-22
4	1.994935685E-31	89.2984728488292	9.999250437E-01	1.499070304E-04	5.448375087E+05	2.196505643E+00	3.242896528E-22
2	1.140283537E-32	89.2984728488293	9.999250437E-01	1.499070304E-04	5.448375087E+05	2.196505642E+00	9.268021896E-24
4	7.964027212E-32	89.2984728488294	9.999250437E-01	1.499070304E-04	5.448375087E+05	2.196505642E+00	1.294603951E-22
2	4.499337160E-31	89.2984728488295	9.999250437E-01	1.499070304E-04	5.448375087E+05	2.196505642E+00	3.656981265E-22
4	1.125639921E-30	89.2984728488296	9.999250437E-01	1.499070304E-04	5.448375087E+05	2.196505642E+00	1.829800238E-21
2	2.106206859E-30	89.2984728488297	9.999250437E-01	1.499070304E-04	5.448375087E+05	2.196505642E+00	1.711887496E-21
4	3.387322148E-30	89.2984728488298	9.999250437E-01	1.499070304E-04	5.448375087E+05	2.196505642E+00	5.506310461E-21
1	4.762136225E-30	89.2984728488299	9.999250437E-01	1.499070304E-04	5.448375087E+05	2.196505642E+00	1.935289837E-21

Рис. 2.23 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9409812811429$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 3, Катамаран с корпусом NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.3$

MC	Γ^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	$R_w [N]$
1	7.009147863E-27	89.9409812811423	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530180E+08	4.732803955E-01	2.577121884E-16
4	4.703769455E-27	89.9409812811424	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530180E+08	4.732803735E-01	6.917923190E-16
2	2.856513377E-27	89.9409812811425	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530180E+08	4.732803516E-01	2.100564176E-16
4	1.468168884E-27	89.9409812811426	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530180E+08	4.732803296E-01	2.159263698E-16
2	5.374316299E-28	89.9409812811427	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	4.732803076E-01	3.952054042E-17
4	6.476790668E-29	89.9409812811428	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	4.732802856E-01	9.525537436E-18
2	2.702882523E-29	89.9409812811429	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	4.732802663E-01	1.987589914E-18
4	4.133106901E-28	89.9409812811430	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	4.732802444E-01	6.078637260E-17
2	1.257565020E-27	89.9409812811431	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	4.732802224E-01	9.247620996E-17
4	2.560328161E-27	89.9409812811432	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	4.732802004E-01	3.765521940E-16
2	4.320874016E-27	89.9409812811433	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	4.732801784E-01	3.177394483E-16
4	6.237418707E-27	89.9409812811434	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	4.732801592E-01	9.173486156E-16
1	8.856795646E-27	89.9409812811435	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	4.732801372E-01	3.256462821E-16

Таблица 2.24 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления C_w , Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $2p/L = 0.5$

F_n	Инсел-Молланд-Велликом (IMW)		МКК Усоверш. Формула Ньюмена
	$C_w \times 10^3$ (Эксперимент)	$C_w \times 10^3$ (Теория)	$C_w \times 10^3$
0.30	2.200	2.400	2.133
0.35	2.400	1.200	2.327
0.40	3.800	2.400	3.875
0.46	5.200	4.300	5.041
0.50	4.800	4.200	4.653
0.60	3.400	3.200	3.296
0.70	2.700	2.600	2.618
0.80	2.100	2.000	2.036
0.90	1.700	1.600	1.648
1.00	1.500	1.400	1.357

Таблица 2.25 – Различие в процентах теоретических и экспериментальных значений R_w [N], Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $2p/L = 0.5$

F_n	Инсел-Молланд-Велликом (IMW)			МКК Усоверш. Формула Ньюмена	
	R_w [N] (Эксперимент)	R_w [N] (Теория)	% различия	R_w [N]	% различия
0.30	1.047	1.142	-9.091	1.015	3.06
0.35	1.554	0.777	50.000	1.507	3.05
0.40	3.214	2.030	36.842	3.278	3.12
0.46	5.816	4.810	17.308	5.638	3.06
0.50	6.343	5.550	12.500	6.149	3.06
0.60	6.470	6.090	5.882	6.273	3.05
0.70	6.994	6.735	3.704	6.780	3.05
0.80	7.104	6.766	4.762	6.887	3.06
0.90	7.279	6.851	5.882	7.057	3.05
1.00	7.929	7.401	6.667	7.174	3.06

Таблица 2.26 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.7210739360760$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 3, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.46$, $2p/L = 0.5$

MC	I^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	$R_w [N]$
1	1.648181070E-28	89.7210739360756	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	3.937449913E+00	4.514460089E-18
4	9.280582672E-29	89.7210739360757	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	3.937449914E+00	5.084006950E-18
2	4.137458034E-29	89.7210739360758	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	3.937449915E+00	1.133272886E-18
4	1.044380321E-29	89.7210739360759	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	3.937449915E+00	5.721232171E-19
2	1.859235047E-31	89.7210739360760	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	3.937449916E+00	5.092548732E-21
4	7.708316709E-30	89.7210739360761	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	3.937449916E+00	4.222702080E-19
2	3.572519551E-29	89.7210739360762	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	3.937449917E+00	9.785330774E-19
4	8.428759689E-29	89.7210739360763	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	3.937449918E+00	4.617368801E-18
1	1.533225509E-28	89.7210739360764	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	3.937449918E+00	4.199590386E-18

Таблица 2.27 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.83606167824640$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 3, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.6$, $2p/L = 0.5$

MC	I^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	$R_w [N]$
1	5.343626333E-28	89.83606167824600	9.99959066E-01	8.186806388E-06	4.269020304E+07	2.036240602E+00	2.191119224E-17
4	3.121307080E-28	89.83606167824610	9.99959066E-01	8.186806388E-06	4.269020304E+07	2.036240595E+00	2.559743326E-17
2	1.664767278E-28	89.83606167824620	9.99959066E-01	8.186806388E-06	4.269020304E+07	2.036240588E+00	6.826269904E-18
4	5.553560726E-29	89.83606167824630	9.99959066E-01	8.186806388E-06	4.269020304E+07	2.036240581E+00	4.554402866E-18
2	4.014044662E-30	89.83606167824640	9.99959066E-01	8.186806388E-06	4.269020304E+07	2.036240573E+00	1.645932884E-19
4	1.185117796E-29	89.83606167824650	9.99959066E-01	8.186806388E-06	4.269020304E+07	2.036240566E+00	9.718996720E-19
2	7.911514397E-29	89.83606167824660	9.99959066E-01	8.186806388E-06	4.269020304E+07	2.036240559E+00	3.244064955E-18
4	1.865875361E-28	89.83606167824670	9.99959066E-01	8.186806388E-06	4.269020304E+07	2.036240552E+00	1.530180076E-17
1	3.916241148E-28	89.83606167824680	9.99959066E-01	8.186806388E-06	4.269020304E+07	2.036240544E+00	1.605829167E-17

Таблица 2.28 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.7259648418313$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 3, Катамаран NPL, Усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.5$

MC	I^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\cos^3\theta$	HIF _T	$R_w [N]$
1	7.6359834371E-30	89.7259648418310	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280357E+00	4.673807234E-22
4	3.1237116146E-30	89.7259648418311	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280358E+00	3.823901941E-22
2	8.0003131135E-31	89.7259648418312	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280358E+00	4.896804927E-23
4	1.0456403138E-32	89.7259648418313	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280359E+00	1.280024061E-24
2	1.2045765279E-30	89.7259648418314	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280360E+00	7.372931778E-23
4	4.4028020725E-30	89.7259648418315	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280360E+00	5.389704775E-22
2	9.5821948410E-30	89.7259648418316	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280361E+00	5.865037815E-22
4	1.5751135510E-29	89.7259648418317	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280361E+00	1.928180484E-21
1	2.4664848585E-29	89.7259648418318	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280362E+00	1.509677815E-21

Таблица 2.29 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9409812811429$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 3, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

MC	I^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	$R_w [N]$
1	2.856513377E-27	89.9409812811425	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530180E+08	3.984816621E+00	1.768584522E-15
4	1.468168884E-27	89.9409812811426	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530180E+08	3.984816628E+00	1.818007078E-15
2	5.374316299E-28	89.9409812811427	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	3.984816635E+00	3.327459529E-16
4	6.476790668E-29	89.9409812811428	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	3.984816642E+00	8.020093221E-17
2	2.702882523E-29	89.9409812811429	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	3.984816648E+00	1.673465374E-17
4	4.133106901E-28	89.9409812811430	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	3.984816655E+00	5.117951845E-16
2	1.257565020E-27	89.9409812811431	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	3.984816662E+00	7.786100599E-16
4	2.560328161E-27	89.9409812811432	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	3.984816669E+00	3.170408266E-15
1	4.320874016E-27	89.9409812811433	9.999994695E-01	1.061045816E-06	9.149530181E+08	3.984816676E+00	2.675230255E-15

Таблица 2.30 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления C_w , Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, в сравнении с данными Инсела-Молланда-Велликома, $2p/L = 0.3$

F_n	Инсел-Молланд-Велликом (IMW)		МКК Усоверш. формула Мичеля-Виглея
	$C_w \times 10^3$ (Exp)	$C_w \times 10^3$	$C_w \times 10^3$
0.30	2.200	3.000	2.133
0.35	3.000	1.000	2.906
0.40	4.000	3.000	3.877
0.46	6.600	5.900	6.393
0.50	6.000	5.600	5.814
0.60	4.000	3.600	3.876
0.70	2.700	2.600	2.616
0.80	1.800	1.700	1.744
0.90	1.700	1.600	1.647
1.00	1.500	1.400	1.453

Таблица 2.31 – Различие в процентах теоретических и экспериментальных значений R_w [N], Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, в сравнении с данными Инсела-Молланда-Велликома, $2p/L = 0.3$

F_n	Инсел-Молланд-Велликом			МКК Усоверш. формула Мичеля-Виглея	
	R_w [N] (Эксперимент)	R_w [N] (Теория)	% различия	R_w [N]	% различия
0.30	1.047	1.427	-36.36	1.014	3.07
0.35	1.943	0.648	66.67	1.882	3.13
0.40	3.383	2.537	25.00	3.279	3.08
0.46	7.382	6.599	10.61	7.151	3.13
0.50	7.929	7.401	6.67	7.684	3.11
0.60	7.612	6.851	10.00	7.376	3.10
0.70	6.994	6.735	3.70	6.776	3.11
0.80	6.089	5.751	5.56	5.900	3.10
0.90	7.279	6.851	5.88	7.053	3.11
1.00	7.929	7.401	6.67	7.681	3.13

Таблица 2.32 – Конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.5181880989191$ и функция формы R_w [N], Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.35$, $2p/L = 0.3$

MC	I^2	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	R_w [N]
1	5.973163672E-29	3.251227490E-29	89.5181880989187	9.999646429E-01	7.071304590E-05	1.681708361E+06	2.637345400E+00	4.507864894E-20
4	3.453795787E-29	1.912898021E-29	89.5181880989188	9.999646429E-01	7.071304590E-05	1.681708361E+06	2.637345400E+00	5.009953230E-20
2	1.619680841E-29	9.284118866E-30	89.5181880989189	9.999646429E-01	7.071304590E-05	1.681708361E+06	2.637345399E+00	1.094408165E-20
4	4.702606366E-30	2.948774944E-30	89.5181880989190	9.999646429E-01	7.071304590E-05	1.681708361E+06	2.637345399E+00	5.732673051E-21
2	3.005815985E-31	3.117645651E-31	89.5181880989191	9.999646429E-01	7.071304590E-05	1.681708361E+06	2.637345398E+00	5.100103400E-22
4	1.712888988E-30	5.916308132E-31	89.5181880989192	9.999646429E-01	7.071304590E-05	1.681708361E+06	2.637345398E+00	6.981560218E-21
2	9.991277505E-30	4.393883945E-30	89.5181880989193	9.999646429E-01	7.071304590E-05	1.681708361E+06	2.637345397E+00	1.240538922E-20
4	2.512688439E-29	1.171071825E-29	89.5181880989194	9.999646429E-01	7.071304590E-05	1.681708361E+06	2.637345397E+00	5.453742420E-20
1	4.723127005E-29	2.2577701784E-29	89.5181880989195	9.999646429E-01	7.071304590E-05	1.681708361E+06	2.637345397E+00	4.698301801E-20

Таблица 2.33 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.721073936076$ и функция формы R_w [N], Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.46$, $2p/L = 0.3$

MC	I^2	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	R_w [N]
1	1.648181070E-28	8.352235240E-28	89.72107393607560	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	2.896154129E+00	1.873067825E-18
4	9.280582672E-29	3.567378290E-29	89.72107393607570	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	2.896154128E+00	4.812820095E-19
2	4.137458034E-29	1.353345644E-29	89.72107393607580	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	2.896154126E+00	1.028421955E-19
4	1.044380321E-29	2.797842036E-30	89.72107393607590	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	2.896154125E+00	4.960293426E-20
2	1.859235047E-31	3.854464932E-31	89.72107393607600	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	2.896154124E+00	1.070170205E-21
4	7.708316709E-30	8.481262365E-30	89.72107393607610	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	2.896154122E+00	6.064583446E-20
2	3.572519551E-29	2.707930627E-29	89.72107393607620	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	2.896154121E+00	1.176321941E-19
4	8.428759689E-29	5.621020589E-29	89.72107393607630	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	2.896154120E+00	5.263019157E-19
1	1.533225509E-28	9.030807137E-29	89.72107393607640	9.999881504E-01	2.369897163E-05	8.667737463E+06	2.896154118E+00	4.563176812E-19

Таблица 2.34 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.64209492385750$ и функция формы R_w [N], Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.7$, $2p/L = 0.3$

MC	I^2	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	R_w [N]
1	2.818465189E-30	2.497482566E-26	89.64209492385730	9.999804899E-01	3.901977874E-05	4.102728671E+06	2.736236731E-01	9.033991005E-19
4	8.382434680E-31	1.129231879E-26	89.64209492385740	9.999804899E-01	3.901977874E-05	4.102728671E+06	2.736236733E-01	8.169087416E-19
2	2.818465189E-30	2.969965638E-27	89.64209492385730	9.999804899E-01	3.901977874E-05	4.102728671E+06	2.736236731E-01	1.075205680E-19
4	8.382434680E-31	4.506454079E-29	89.64209492385740	9.999804899E-01	3.901977874E-05	4.102728671E+06	2.736236733E-01	3.320451987E-21
2	2.319810408E-32	4.267912202E-30	89.64209492385750	9.999804899E-01	3.901977874E-05	4.102728671E+06	2.736236735E-01	1.552021951E-22
4	2.653124338E-31	1.051246538E-29	89.64209492385760	9.999804899E-01	3.901977874E-05	4.102728671E+06	2.736236736E-01	7.796279549E-22
2	1.644252766E-30	7.316802314E-29	89.64209492385770	9.999804899E-01	3.901977874E-05	4.102728671E+06	2.736236738E-01	2.705833368E-21
4	4.185631213E-30	1.921624426E-28	89.64209492385780	9.999804899E-01	3.901977874E-05	4.102728671E+06	2.736236739E-01	1.420315486E-20
1	7.885583446E-30	3.674909115E-28	89.64209492385790	9.999804899E-01	3.901977874E-05	4.102728671E+06	2.736236741E-01	1.357673233E-20

Таблица 2.35 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.783481739949$ и функция формы R_w [N], Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.9$, $2p/L = 0.3$

MC	I^2	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	R_w [N]
1	2.94931E-29	1.126919152E-27	89.78348173994860	9.999928598E-01	1.428044447E-05	1.853051174E+07	3.929041005E+00	1.641031165E-18
4	1.73806E-29	6.146438504E-28	89.78348173994870	9.999928598E-01	1.428044447E-05	1.853051174E+07	3.929041005E+00	1.793775269E-18
2	9.38592E-30	2.564452136E-28	89.78348173994880	9.999928598E-01	1.428044447E-05	1.853051174E+07	3.929041004E+00	3.772332707E-19
4	3.23881E-30	5.237782720E-29	89.78348173994890	9.999928598E-01	1.428044447E-05	1.853051174E+07	3.929041004E+00	1.578479328E-19
2	2.87346E-31	1.951822434E-31	89.78348173994900	9.999928598E-01	1.428044447E-05	1.853051174E+07	3.929041004E+00	6.847416242E-22
4	5.21717E-31	8.498717151E-29	89.78348173994910	9.999928598E-01	1.428044447E-05	1.853051174E+07	3.929041004E+00	2.426863808E-19
2	3.94508E-30	3.238003125E-28	89.78348173994920	9.999928598E-01	1.428044447E-05	1.853051174E+07	3.929041003E+00	4.650940147E-19
4	9.55001E-30	7.166626743E-28	89.78348173994930	9.999928598E-01	1.428044447E-05	1.853051174E+07	3.929041003E+00	2.061094843E-18
1	1.89559E-29	1.263618383E-27	89.78348173994940	9.999928598E-01	1.428044447E-05	1.853051174E+07	3.929041003E+00	1.820064023E-18

Таблица 2.36 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления C_w , Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея в сравнении с данными Инсела-Молланда-Велликома, $2p/L = 0.5$

F_n	Инсел-Молланд-Велликом (IMW)		МКК Усоверш. формула Мичеля-Виглея
	$C_w \times 10^3$ (Exp)	$C_w \times 10^3$	$C_w \times 10^3$
0.30	2.200	2.400	2.132
0.35	2.400	1.200	2.325
0.40	3.800	2.400	3.875
0.46	5.200	4.300	5.038
0.50	4.800	4.200	4.651
0.60	3.400	3.200	3.294
0.70	2.700	2.600	2.617
0.80	2.100	2.000	2.035
0.90	1.700	1.600	1.647
1.00	1.500	1.400	1.453

Таблица 2.37 – Различие в процентах между теоретическими и экспериментальными значениями R_w [N], Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея в сравнении Инсела-Молланда-Велликома, $2p/L = 0.5$

F_n	Инсел-Молланд-Велликом			МКК Усоверш. формула Мичеля-Виглея	
	R_w [N] (Exp)	R_w [N] (Theo)	% Diff	R_w [N]	% Diff
0.30	1.047	1.142	-9.09	1.014	3.06
0.35	1.554	0.777	50.00	1.506	3.05
0.40	3.214	2.030	36.84	3.278	3.09
0.46	5.816	4.810	17.31	5.635	3.06
0.50	6.343	5.550	12.50	6.146	3.06
0.60	6.470	6.090	5.88	6.269	3.05
0.70	6.994	6.735	3.70	6.778	3.05
0.80	7.104	6.766	4.76	6.884	3.06
0.90	7.279	6.851	5.88	7.053	3.05
1.00	7.929	7.401	6.67	7.681	3.06

Таблица 2.38 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.63112121329010$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.4$, $2p/L = 0.5$

MC	I^2	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	$R_w [N]$
1	5.275432263E-27	5.471177665E-29	89.63112121328700	9.999792752E-01	4.144919461E-05	3.747363787E+06	2.350723052E-01	4.130661614E-24
4	2.402745746E-27	3.204670524E-29	89.63112121328800	9.999792752E-01	4.144919460E-05	3.747363787E+06	2.350722986E-01	3.773745458E-24
2	6.303934051E-28	1.542268006E-29	89.63112121328900	9.999792752E-01	4.144919460E-05	3.747363787E+06	2.350722918E-01	5.004832029E-25
4	2.249788723E-30	5.827082597E-30	89.63112121329000	9.999792752E-01	4.144919460E-05	3.747363787E+06	2.350722852E-01	1.251854330E-26
2	8.515790025E-31	4.615514033E-31	89.63112121329010	9.999792752E-01	4.144919460E-05	3.747363787E+06	2.350722845E-01	1.017626699E-27
4	1.115925807E-29	1.114362813E-30	89.63112121329020	9.999792752E-01	4.144919460E-05	3.747363787E+06	2.350722838E-01	1.902318949E-26
2	3.322240324E-29	7.775688992E-30	89.63112121329030	9.999792752E-01	4.144919460E-05	3.747363787E+06	2.350722831E-01	3.177198002E-26
4	6.698156317E-29	2.046523716E-29	89.63112121329040	9.999792752E-01	4.144919460E-05	3.747363787E+06	2.350722824E-01	1.355359644E-25
1	1.124652897E-28	3.913766160E-29	89.63112121329050	9.999792752E-01	4.144919460E-05	3.747363787E+06	2.350722817E-01	1.174865866E-25

Таблица 2.39 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.7737868038444$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.6$, $2p/L = 0.5$

MC	I^2	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	$R_w [N]$
1	5.238105652E-30	2.623754859E-28	89.77378680384400	9.999922060E-01	1.558792654E-05	1.624865712E+07	4.804539852E-05	9.161739846E-24
4	3.239173517E-30	1.634516469E-28	89.77378680384410	9.999922060E-01	1.558792654E-05	1.624865712E+07	4.804538156E-05	1.141330216E-23
2	1.539860895E-30	7.894436408E-29	89.77378680384420	9.999922060E-01	1.558792654E-05	1.624865712E+07	4.804536216E-05	2.755371910E-24
4	4.592431407E-31	2.483832639E-29	89.77378680384430	9.999922060E-01	1.558792654E-05	1.624865712E+07	4.804534276E-05	1.732120408E-24
2	1.341868959E-32	1.171911753E-30	89.77378680384440	9.999922060E-01	1.558792654E-05	1.624865712E+07	4.804532336E-05	4.057967344E-26
4	1.975098455E-31	7.943710104E-30	89.77378680384450	9.999922060E-01	1.558792654E-05	1.624865712E+07	4.804530397E-05	5.574275355E-25
2	8.745377237E-31	4.513845507E-29	89.77378680384460	9.999922060E-01	1.558792654E-05	1.624865712E+07	4.804528457E-05	1.575249102E-24
4	2.240418752E-30	1.025997238E-28	89.77378680384470	9.999922060E-01	1.558792654E-05	1.624865712E+07	4.804526759E-05	7.178376015E-24
1	4.239743796E-30	1.969127696E-28	89.77378680384480	9.999922060E-01	1.558792654E-05	1.624865712E+07	4.804524819E-05	6.886426133E-24

Таблица 2.40 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.7259648418313$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.5$

MC	I^2	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	$R_w [N]$
1	1.415212204E-29	7.867808187E-28	89.7259648418309	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280356E+00	6.046628543E-19
4	7.635983437E-30	4.457430126E-28	89.7259648418310	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280357E+00	6.845552827E-19
2	3.123711615E-30	2.263421201E-28	89.7259648418311	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280358E+00	1.732348088E-19
4	8.000313113E-31	6.578728199E-29	89.7259648418312	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280358E+00	1.005399401E-19
2	1.045640314E-32	1.379919376E-30	89.7259648418313	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280359E+00	1.049661645E-21
4	1.204576528E-30	3.314056121E-29	89.7259648418314	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280360E+00	5.185759750E-20
2	4.402802073E-30	1.838681646E-28	89.7259648418315	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280360E+00	1.421348210E-19
4	9.582194841E-30	4.199870047E-28	89.7259648418316	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280361E+00	6.486049591E-19
1	1.575113551E-29	7.056483215E-28	89.7259648418317	9.999885624E-01	2.287515232E-05	9.140164415E+06	3.348280361E+00	5.446191975E-19

Таблица 2.41 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.78348173994900$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.9$, $2p/L = 0.5$

MC	I^2	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	$R_w [N]$
1	2.949308478E-29	1.126919152E-27	89.78348173994860	9.999984604E-01	3.079269315E-06	1.850667885E+08	3.565880706E+00	1.487435537E-17
4	1.738060911E-29	6.146438504E-28	89.78348173994870	9.999984604E-01	3.079269315E-06	1.850667885E+08	3.565880700E+00	1.625883246E-17
2	9.385917151E-30	2.564452136E-28	89.78348173994880	9.999984604E-01	3.079269315E-06	1.850667885E+08	3.565880695E+00	3.419255359E-18
4	3.238813374E-30	5.237782720E-29	89.78348173994890	9.999984604E-01	3.079269315E-06	1.850667885E+08	3.565880690E+00	1.430738360E-18
2	2.873458218E-31	1.951822434E-31	89.78348173994900	9.999984604E-01	3.079269315E-06	1.850667885E+08	3.565880685E+00	6.206518449E-21
4	5.217165465E-31	8.498717151E-29	89.78348173994910	9.999984604E-01	3.079269315E-06	1.850667885E+08	3.565880680E+00	2.199716571E-18
2	3.945083908E-30	3.238003125E-28	89.78348173994920	9.999984604E-01	3.079269315E-06	1.850667885E+08	3.565880674E+00	4.215625971E-18
4	9.550010770E-30	8.498717151E-29	89.78348173994930	9.999984604E-01	3.079269315E-06	1.850667885E+08	3.565880680E+00	2.431969485E-18
1	1.895586173E-29	3.238003125E-28	89.78348173994940	9.999984604E-01	3.079269315E-06	1.850667885E+08	3.565880674E+00	4.408702138E-18

Таблица 2.42 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.8246223203621$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Катамаран NRL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

MC	I^2	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	$R_w [N]$
1	3.980902793E-29	4.037438705E-27	89.8246223203617	9.999898999E-01	2.020263269E-06	3.482475326E+08	1.828498573E-02	2.049415900E-19
4	6.193024942E-29	2.922380743E-27	89.8246223203616	9.999898999E-01	2.020263269E-06	3.482475326E+08	1.828498319E-02	6.000217743E-19
2	3.980902793E-29	1.868336326E-27	89.8246223203617	9.999898999E-01	2.020263269E-06	3.482475326E+08	1.828498027E-02	1.918246090E-19
4	2.445436044E-29	1.049035235E-27	89.8246223203618	9.999898999E-01	2.020263269E-06	3.482475326E+08	1.828497736E-02	2.158343845E-19
2	1.147158778E-29	4.645326893E-28	89.8246223203619	9.999898999E-01	2.020263269E-06	3.482475326E+08	1.828497445E-02	4.785238454E-20
4	3.346015407E-30	1.148064262E-28	89.8246223203620	9.999898999E-01	2.020263269E-06	3.482475326E+08	1.828497153E-02	2.375556456E-20
2	7.250844857E-32	1.414096018E-32	89.8246223203621	9.999898999E-01	2.020263269E-06	3.482475326E+08	1.828496862E-02	8.710803044E-24
4	1.655562492E-30	9.215345916E-29	89.8246223203622	9.999898999E-01	2.020263269E-06	3.482475326E+08	1.828496607E-02	1.886110498E-20
2	7.025234708E-30	4.176261140E-28	89.8246223203623	9.999898999E-01	2.020263269E-06	3.482475326E+08	1.828496316E-02	4.268988340E-20
4	1.772012752E-29	9.778219505E-28	89.8246223203624	9.999898999E-01	2.020263269E-06	3.482475326E+08	1.828496024E-02	2.001621734E-19
2	3.326393918E-29	1.772909991E-27	89.8246223203625	9.999898999E-01	2.020263269E-06	3.482475326E+08	1.828495733E-02	1.815732604E-19
4	5.370329304E-29	2.802662643E-27	89.8246223203626	9.999898999E-01	2.020263269E-06	3.482475326E+08	1.828495442E-02	5.742964003E-19
1	8.247996195E-29	3.896402907E-27	89.8246223203627	9.999898999E-01	2.020263269E-06	3.482475326E+08	1.828495187E-02	1.999969403E-19

ГЛАВА 3

3. ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРЕХКОРПУСНЫХ СУДОВ (ТРИМАРАНОВ)

3.1. Предыстория. Трехкорпусное судно, широко известное как катамаран, принадлежит семейству многокорпусных судов. Как ясно из названия тримаран формируется комбинацией центрального корпуса и двух боковых корпусов по правому и по левому борту от центрального корпуса. Центральный корпус обычно больше, чем боковые. В прошлом выполнялось немало исследований по тримаранам. Ниже, кратко резюмируются основные преимущества тримаранов по сравнению с однокорпусными судами и двухкорпусными судами (катамаранами), а также приведены общие выводы этих исследований:

- Тримараны всегда лучше однокорпусных судов и катамаранов равного водоизмещения с точки зрения снижения волнового сопротивления;
- Волновое сопротивление зависит от поперечного разноса корпусов;
- Снижение волновое сопротивление обратно пропорционально числу корпусов;
- Оптимальный поперечный разнос корпусов приводит к благоприятной интерференции расходящихся волн;
- По сравнению с однокорпусными судами и катамаранами в случае тримаранов можно получить отличную гидродинамическую эффективность;
- Увеличение удлинения тримарана ведет к росту скорости и меньшим затратам мощности;
- Очевидно меньшее сопротивление при высоких скоростях по сравнению с однокорпусными судами и катамаранами равного водоизмещения;
- Большая площадь палубы;
- Большая остойчивость;
- Большая комфортность;
- Улучшенная мореходность;
- К недостаткам относятся увеличенная площадь смоченной поверхности и, следовательно, большее сопротивление трения, особенно при малых скоростях;
- Сочетание оптимальной конфигурации корпуса и его удлиненности приводит к уменьшению волнового сопротивления;

- Большая живучесть при боковых ударах в связи с наличием боковых корпусов;
- Большие возможности выбора расположения главной движительной установки;
- Для решения задачи определения волнового сопротивления многокорпусного судна были разработаны различные теоретические методы.

В этой главе представлены результаты исследования задач волнового сопротивления для тримаранов посредством теоретического метода конечного корня ранее примененного в аналогичных исследованиях для однокорпусных судов и катамаранов в Главе 1 и Главе 2, а модельные эксперименты были выполнены в некотором диапазоне чисел Фруда и при различных поперечных и продольных разносах корпусов и проанализированы с целью верификации и апробации теоретических результатов.

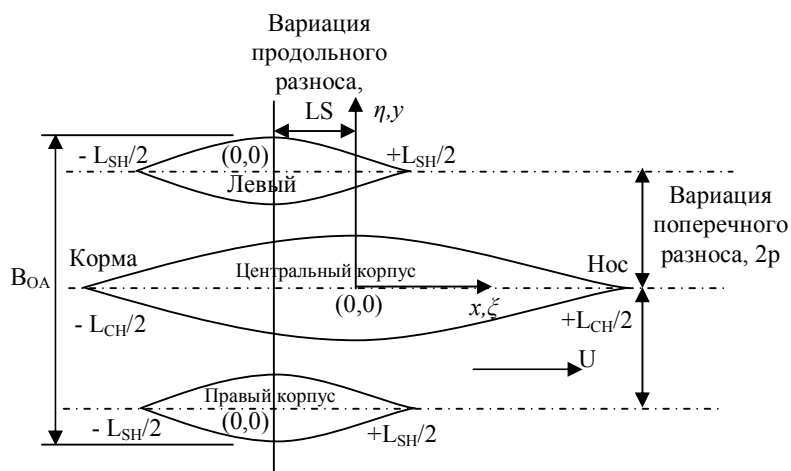


Рис. 3.1 – Тримаран (вид в плане) и координатная система

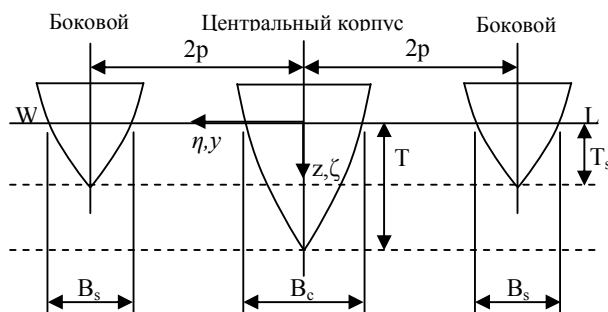


Рис. 3.2 – Тримаран (вид спереди) и система координат

3.2. Основное уравнение – Формула Така-Лазаускаса вычисления волнового сопротивления тримаранов. В данном исследовании вывод выражения для волнового сопротивления тримарана заимствован из работы Така и Лазаускаса [37], где дана формула для вычисления волнового сопротивления многокорпусного судна, также приведенная Фалтинсеном [28] в

Главе 4 в связи волновым сопротивлением и амплитудными волновыми функциями для одного корпуса, найденными Ньюменом [9]. Поскольку конфигурация корпуса имеет поперечную симметрию, полное волновое сопротивление равно волновому сопротивлению двухкорпусного судна с неидентичными корпусами, при наличии или отсутствии продольного сдвига, причем последнее учитывается посредством коэффициента взаимодействия корпусом $HIF_L(\theta)$. Результирующая волновая система и волновое сопротивление многокорпусного судна с n -корпусами по Таку-Лазаускасу даются выражениями :

$$\zeta_j(x,y) = Re \int_{j=1 \dots n} A_j(\theta) \exp[(-ig/U^2 \cos^2 \theta)(x_{j0} \cos \theta + y_{j0} \sin \theta)] \cdot \exp[(-ig/U^2 \cos^2 \theta)(x \cos \theta + y \sin \theta)] d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2,$$

$$R_w = (\pi \rho U^2 / 2) \int |A(\theta)|^2 \cos^3 \theta d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$$

$$A(\theta) = \sum A(\theta)_j \exp[-i(g/U^2 \cos^2 \theta)(x_j \cos \theta + y_j \sin \theta)], j = 1 \dots n$$

Для тримаранов, $n = 3$

Рассматривая действительные части, получим интегральную функцию в следующем виде .

$$R_w = (\pi \rho U^2 / 2) \int |A(\theta)_{dh}|^2 HIF_T(\theta)_j HIF_L(\theta)_j \cos^3 \theta d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$$

$$HIF_L(\theta) = \cos^2(gx/U^2 \cos(\theta))$$

$$HIF_T(\theta) = \cos^2[0.5(2p/L) \sin \theta / (Fn^2 \cos^2 \theta)]$$

$A(\theta)_{dh}$ – волновая амплитудная функция для одного полу-корпуса по Ньюмену или Мичелю-Виглею, а нижний индекс dh – ассоциирован с отдельным полу-корпусом

Поскольку на каждой фазе интегрирования продольное положение начала координат (x) боковых и центрального корпусов фиксировано, абсцисса x в выражении для $HIF_L(\theta)$ заменяется значением продольного разнеса LS , то есть продольным расстоянием между началом координат центрального и боковых корпусов;

$$HIF_L(\theta) = \cos^2(gLS/U^2 \cos(\theta))$$

В случае, когда начала координат центрального и боковых корпусов находятся на одной линии $LS = 0$ и поэтому $HIF_L(\theta) = 1$

3.3. Усовершенствование основного уравнения. Как и в случае усовершенствованных выражений для определения волнового сопротивления однокорпусных и двухкорпусных судов, верхний предел интегрирования $\pi/2$ для тримарана также заменяется на максимальное значение угла распространения волн θ_{max} с учетом того, что существует комбинированная система расходящихся и поперечных волн, фигурирующая в полученном интеграле волнового сопротивления R_w [N]. θ_{max} понимается как конечный корень подынтегральной функции и устанавливает верхний предел интегрирования. Поэтому усовершенствованное выражение для волнового сопротивления R_w тримарана принимает вид;

$$R_w = 2(\pi\rho U^2/2) \int |A(\theta)_{jd}|^2 HIF_T(\theta)_j HIF_L(\theta)_j \cos^3 \theta d\theta; 0 \leq \theta \leq \theta_{pmax}$$

3.4. Методика вычислений. Здесь используется тот же метод интегрирования и методика вычислений как и в случае волнового сопротивления R_w однокорпусных и двухкорпусных судов в Главе 1 и в Главе 2. При осуществлении вычисления интеграла I (в продольном направлении) центральный корпус разбивается на 192 интервала равной длины вдоль длины модели судна (то есть 193 шпангоута или 193 узловых сечения) и 8 равных интегралов в вертикальном направлении (9 ватерлиний) в согласовании с разбивкой боковых корпусов. Боковые корпуса разбиваются на 138 равных промежутков (139 шпангоутов или узловых сечений) точно также как и в случае однокорпусных и двухкорпусных судов как сделано в Главе 1 и в Главе 2. Для целей интегрирования интервалы продольного и поперечного разбиения для центрального корпуса и боковых корпусов одинаковы. В угловом направлении интегрирование проводится при угловом интервале в один (1) градус в диапазоне 0 до 88 градусов. Кроме того, подходящий единый интервал выбирается для трех (3) последних значений угла (два равных угловых интервала) вплоть до θ_{pmax} . Интегралы I для бокового и центрального корпусов вначале рассчитываются в отдельных подпрограммах при той же методике вычислений интегралов I как и в случае отдельного корпуса или для однокорпусного судна как в Главе 1. Далее вычисленные значения используются для проведения интегрирования в вертикальном направлении и при последующем вычислении волнового сопротивления R_w тримарана. Кроме коэффициента поперечного взаимодействия корпусов $HIF_T(\theta)$ как для двухкорпусного судна, в связи с наличием продольного разнеса центрального и боковых корпусов катамарана, учитывается так называемый коэффициент продольного взаимодействия корпусов $HIF_L(\theta)$. При определении R_w интегрирование проводилось систематически и последовательно с учетом диаграммы расчета, показанной в Таблицах 3.1 и 3.2 и следующей диаграммой расчета, показанной на Рис. 3.3 Приложения 5.

3.5. Экспериментальный анализ. Модельные эксперименты при различных условиях для Исследований 1 - 4 проводились в опытовом бассейне Морского технологического центра Малазийского теоретические данные по волновому сопротивлению. При этом соблюдались все необходимые подготовительные мероприятия и стандартные процедуры. Экспериментальный анализ был проведен в соответствии с рекомендациями и процедурами МКОБ 1957 и с применением метода Прохаски форм-фактора (см. Главу 1). Результаты экспериментального анализа представлены в Таблицах 3.3. - 3.7 и на графиках нанесенных на Рис. 3.4 - 3.7 и позволяют определить форм-фактор $(1+k)$ при различных условиях и конфигураций корпуса. По завершении модельных испытаний данные анализировались по методике МКОБ с целью получения полного сопротивления и сопротивления трения с использованием метода форм-фактора.

3.6. Теоретический анализ. Теоретический анализ, соответствующий условиям испытаний, был выполнен в соответствии с методиками аналогичными использованным для однокорпусных и двухкорпусных судов в Главе 1 и Главе 2 с применением форматов и расчетных методик теоретического определения волнового сопротивления R_w как в Приложении. Как обычно в заключительной части расчетов итерациям и определяется конечный корень подынтегральной функции, соответствующий верхнему пределу в интеграле волнового

сопротивления и представляющий собой точное значение максимального угла распространения волн θ_{rmax} первичной волновой системы. Результаты теоретического анализа подытожены в приведенных ниже Таблицах, далее строятся графики зависимостей коэффициентов волнового сопротивления в функции числа Фруда, а также кривые подинтегральной функции fR_w , как иллюстрация существования конечных корней. Характерные результаты расчета волнового сопротивления R_w и подинтегральные функции формы $R_w [N]$ приведены на последующих страницах, а также в Таблицах в Приложении 5. Исследование 5 иллюстрирует апробацию метода конечного корня в сравнении с экспериментальными методами определения волнового сопротивления посредством измерения профиля волн в следе за судном (Метод Ландвебера преобразования Фурье, метод Хогбена матричных элементов, метод Баба эквивалентных особенностей). Соответствующие результаты представлены в Таблицах 3.12 - 3.13 и на Рис. 3.14.

Основные размерения модели в для случая проведенных исследований приведены ниже.

Главные размерения боковых корпусов (Корпус Виглея 1):

Длина между перпендикуляров, L_{BP}	- 1.8 м
Длина по ватерлинии, L_{WL}	- 1.8 м
Осадка, T	- 0.1125 м
Ширина по ватерлинии, B_{WL}	- 0.18 м
Водоизмещение, Δ	- 0.0162 т
Площадь смоченной поверхности, S при осадке T	- 0.482 м ²

Главные размерения центрального корпуса (Корпус Виглея 3):

Длина между перпендикулярами, L_{BP}	- 2.5 м
Длина по ватерлинии, L_{WL}	- 2.5 м
Осадка, T	- 0.1547 м
Ширина по ватерлинии, B_{WL}	- 0.125 м
Водоизмещение, Δ	- 0.0309 т
Площадь смоченной поверхности, S при осадке T	- 0.921 м ²

Главные размерения центрального корпуса (Корпус Виглея 4):

Длина между перпендикулярами, L_{BP}	- 2.4384 м
Длина по ватерлинии, L_{WL}	- 2.4384 м
Осадка, T	- 0.1524 м
Ширина по ватерлинии, B_{WL}	- 0.24384 м
Водоизмещение, Δ	- 0.04027 т
Площадь смоченной поверхности, S при осадке T	- 0.88842 м ²

Главные размерения центрального корпуса (Корпус Виглея 5):

Длина между перпендикулярами, L_{BP}	- 1.2192 м
Длина по ватерлинии, L_{WL}	- 1.2192 м
Осадка, T	- 0.0762 м
Ширина по ватерлинии, B_{WL}	- 0.12192 м
Водоизмещение, Δ	- 0.005034 т
Площадь смоченной поверхности, S при осадке T	- 0.2221 м ²

Экспериментальный и теоретический анализ, и, следовательно, апробация выполнены для следующих 5 случаев исследований, соответствующих следующим числам Фруда по длине центрального корпуса 0.255, 0.339, 0.424, 0.509 и 0.594:

- Исследование 1 – Корпуса Виглея 1 и 3, Сравнение эксперимента с теорией (МКК) для $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м;
- Исследование 2 – Корпуса Виглея 1 и 3, Сравнение эксперимента с теорией (МКК) для $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ м;
- Исследование 3 – Корпуса Виглея 1 и 3, Сравнение эксперимента с теорией (МКК) для $2p/L = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму;
- Исследование 4 – Корпуса Виглея 1 и 3, Сравнение эксперимента с теорией (МКК) для $2p/L = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму;
- Исследование 5 - Корпуса Виглея 4 и 5, Сравнение эксперимента (измерение волнового профиля) с теорией (МКК) для $2p/L = 0.3$, $LS = 0.61$ м в корму, $F_{нСН} = 0.33$;
- Исследование 6 - Корпуса Виглея 4 и 5, Сравнение эксперимента (измерение волнового профиля) с теорией (МКК) для $2p/L = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму, $F_{нСН} = 0.42$.

3.7. Результаты экспериментального и теоретического анализа и апробация. Экспериментальные и теоретические (МКК) результаты представлены в Таблицах 3.3 - 3.29 и на Рис. 3.4 - 3.16 на последующих страницах и Приложение. Как видно из Таблицы 3.11, погрешность результатов, полученных посредством МКК, по сравнению с экспериментом укладывается в 3.2 %.

Таблица 3.3 – Результаты экспериментального анализа
(Исследование 1, $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м)

F_n	$C_T \times 10^3$	$C_F \times 10^3$	$C_W \times 10^3$	R_T [N]	R_W [N]
0.255	4.568	3.596	0.253	6.815	0.377
0.339	5.521	3.407	1.433	14.642	3.799
0.424	10.111	3.270	6.187	41.905	25.640
0.509	8.904	3.165	5.106	53.147	30.479
0.594	7.318	3.080	3.623	59.452	29.432

Таблица 3.4 – Результаты экспериментального анализа
(Исследование 2, $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ м)

F_n	$C_T \times 10^3$	$C_F \times 10^3$	$C_W \times 10^3$	R_T [N]	R_W [N]
0.255	4.739	3.596	0.604	7.071	0.901
0.339	6.107	3.407	2.189	16.196	5.805
0.424	9.539	3.270	6.031	40.582	24.995
0.509	7.929	3.165	4.533	48.782	27.058
0.594	6.638	3.080	3.254	55.206	26.436

Таблица 3.5 – Результаты экспериментального анализа
(Исследование 3, $2p/L = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму)

F_n	$C_T \times 10^3$	$C_F \times 10^3$	$C_W \times 10^3$	R_T [N]	R_W [N]
0.255	5.395	3.596	0.432	8.049	0.645
0.339	6.140	3.407	1.439	16.286	3.816
0.424	9.427	3.270	4.914	39.071	20.366
0.510	8.895	3.165	4.528	53.096	27.027
0.594	7.273	3.080	3.023	59.085	24.561

Таблица 3.6 – Результаты экспериментального анализа
(Исследование 4, $2p/L = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму)

F_n	$C_T \times 10^3$	$C_F \times 10^3$	$C_W \times 10^3$	R_T [N]	R_W [N]
0.255	5.464	3.596	8.153	0.214	0.319
0.339	5.929	3.407	15.963	1.044	2.770
0.424	9.108	3.270	37.747	4.333	17.958
0.509	8.361	3.165	49.903	3.740	22.323
0.594	6.998	3.080	56.846	2.501	20.321

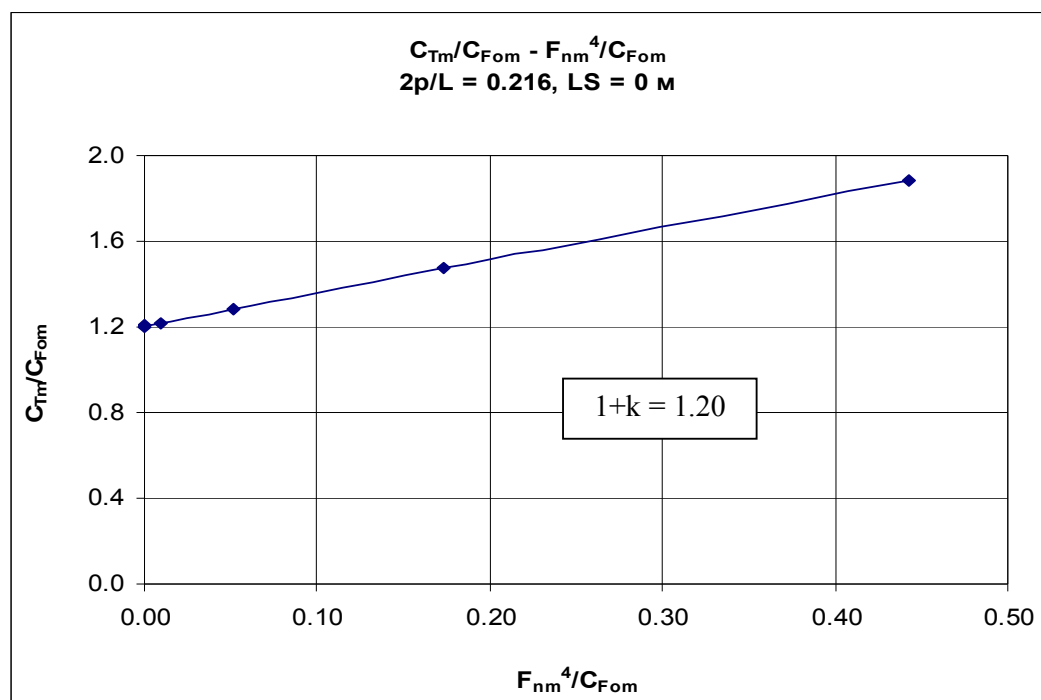


Рис. 3.4 – График C_{Tm}/C_{Fom} в функции от F_{nm}^4/C_{Fom} для форм-фактора $(1+k)$
(Исследование 1, $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м)

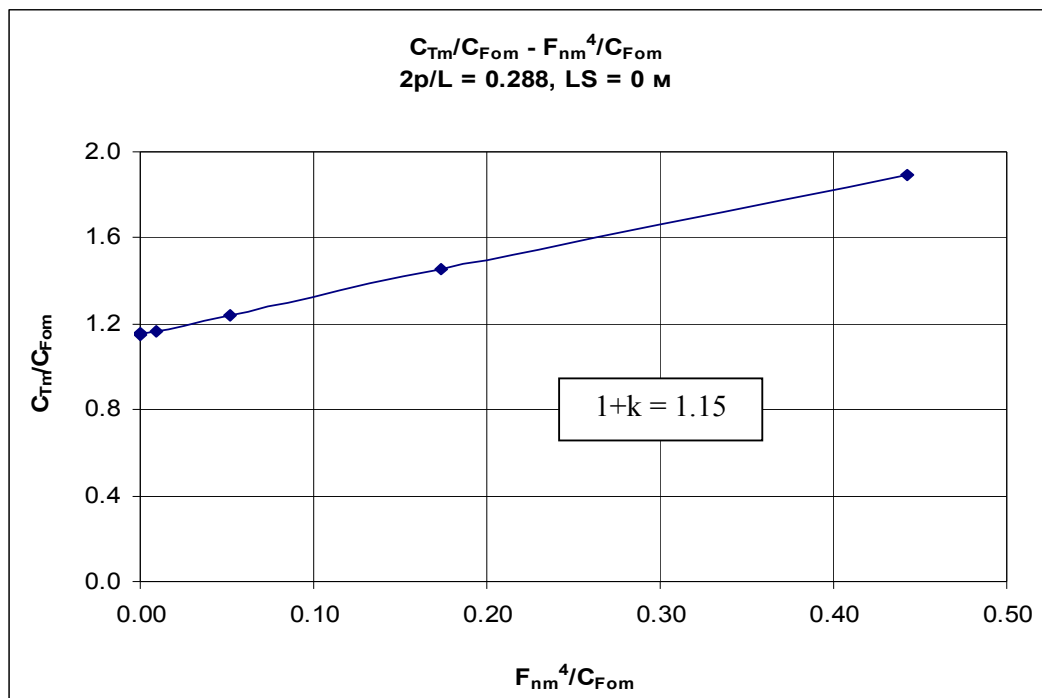


Рис. 3.5 – График C_{Tm}/C_{Fom} в функции от F_{nm}^4/C_{Fom} для форм-фактора $(1+k)$
(Исследование 2, $2p/L = 0.288, LS = 0 \text{ м}$)

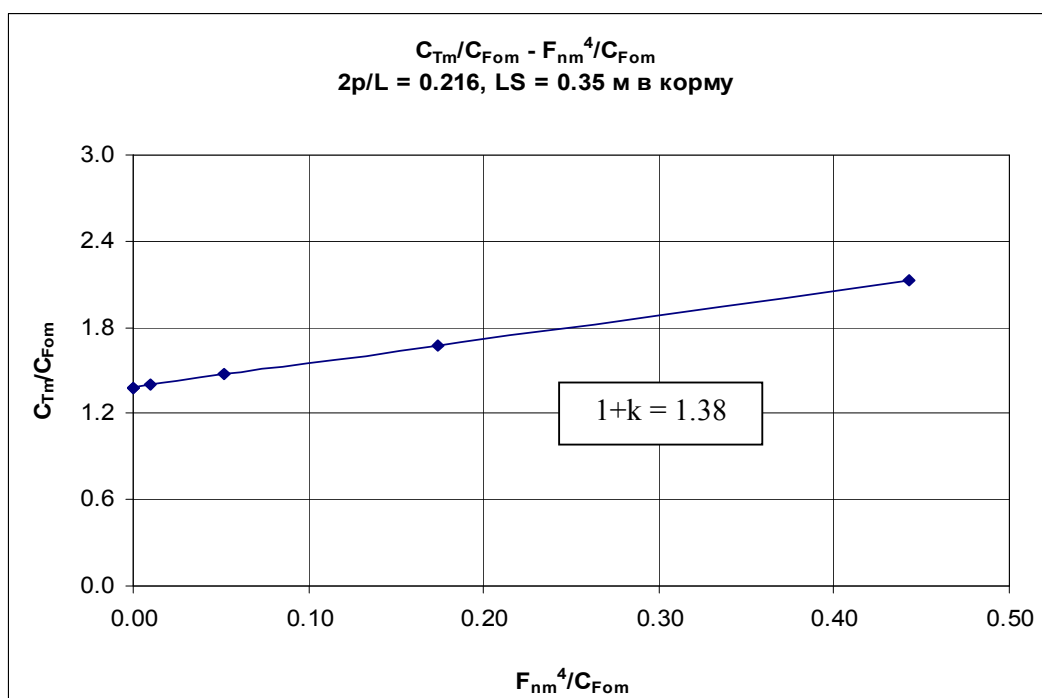


Рис. 3.6 – График C_{Tm}/C_{Fom} в функции от F_{nm}^4/C_{Fom} для форм-фактора $(1+k)$
(Исследование 3, $2p/L = 0.216, LS = 0.35 \text{ м в корму}$)

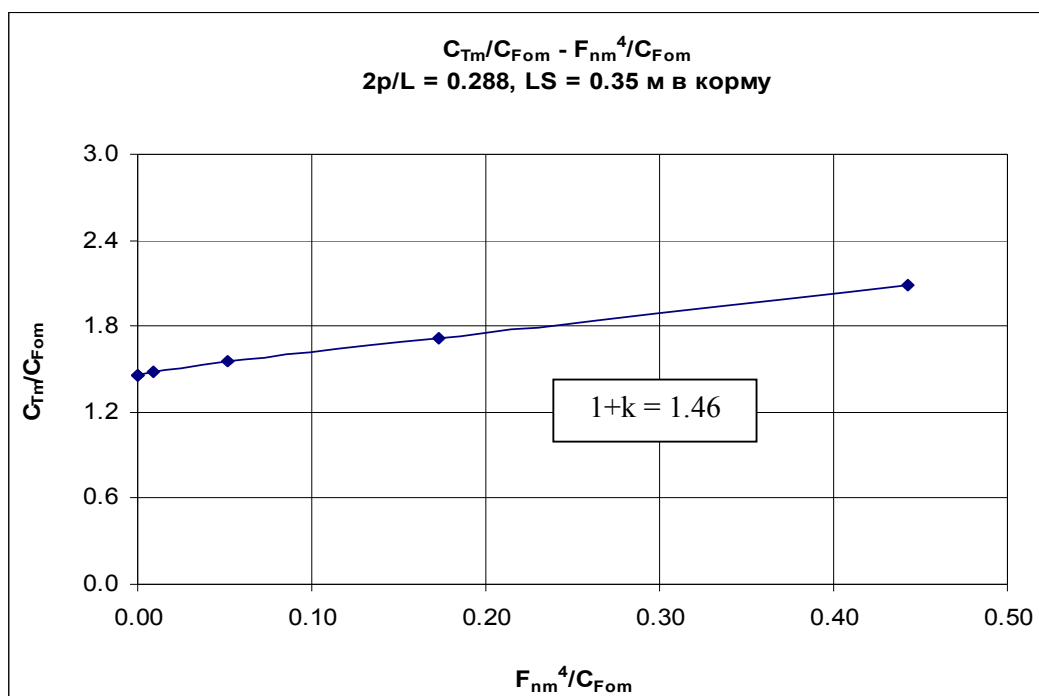


Рис. 3.7 – График C_{Tm}/C_{Fom} в функции от F_{nm}^4/C_{Fom} для форм-фактора $(1+k)$
(Исследование 4, $2p/L = 0.288, LS = 0.35 \text{ м в корму}$)

Таблица 3.7 – Экспериментальное значение коэффициента волнового сопротивления судна C_w

F_n	Экспериментальный коэффициент волнового сопротивления, $C_w \times 10^3$ (Исследования 1- 4)			
	$2p/L = 0.216,$ $LS = 0 \text{ м}$	$2p/L = 0.288,$ $LS = 0 \text{ м}$	$2p/L = 0.216,$ $LS = 0.35 \text{ м в}$ корму	$2p/L = 0.288,$ $LS = 0.35 \text{ м в}$ корму
0.255	0.253	0.604	0.432	0.214
0.339	1.433	2.189	1.439	1.044
0.424	6.187	5.778	4.914	4.333
0.509	5.106	4.533	4.528	3.740
0.594	3.623	3.254	3.023	2.501

Таблица 3.8 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления C_w

F_n	Теоретический коэффициент волнового сопротивления, $C_w \times 10^3$ (Исследования 1 - 4)			
	$2p/L = 0.216,$ $LS = 0 \text{ м}$	$2p/L = 0.288,$ $LS = 0 \text{ м}$	$2p/L = 0.216,$ $LS = 0.35 \text{ м в}$ корму	$2p/L = 0.288,$ $LS = 0.35 \text{ м в}$ корму
0.255	0.2449	0.5847	0.4190	0.2074
0.339	1.3875	2.1197	1.3938	1.0117
0.424	5.9919	5.5963	4.7601	4.1975
0.509	4.9462	4.3918	4.3855	3.6235
0.594	3.5092	3.1520	2.9283	2.4228

Таблица 3.9 – Экспериментальный коэффициент волнового сопротивления R_w [N]

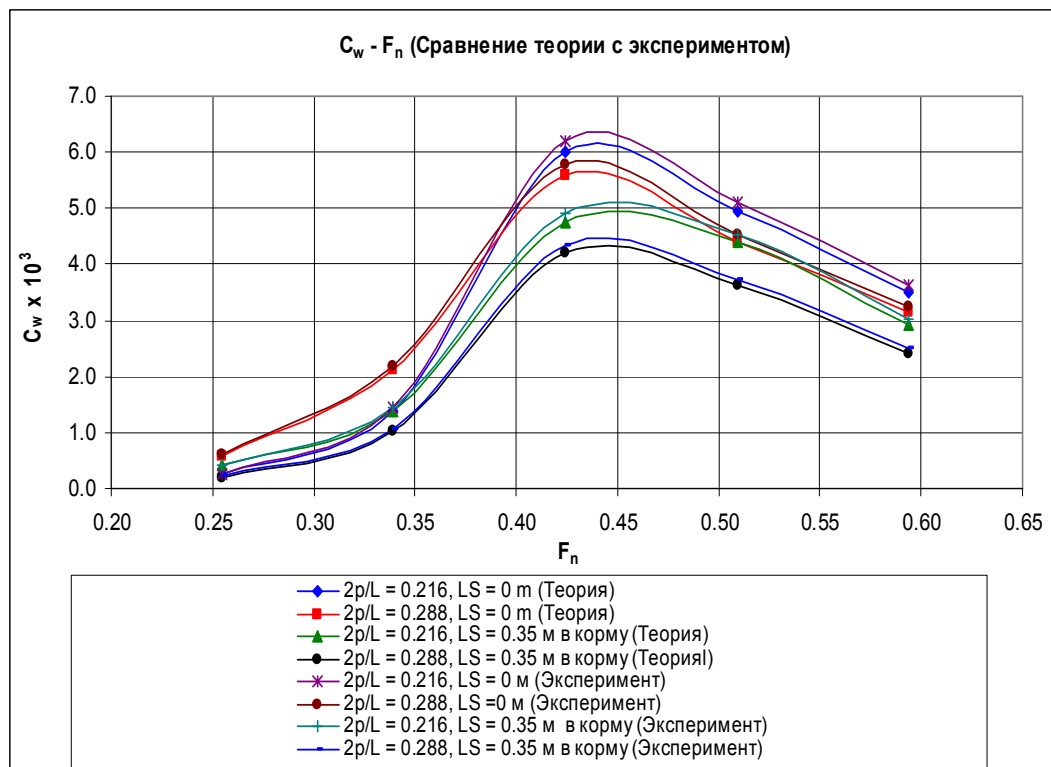
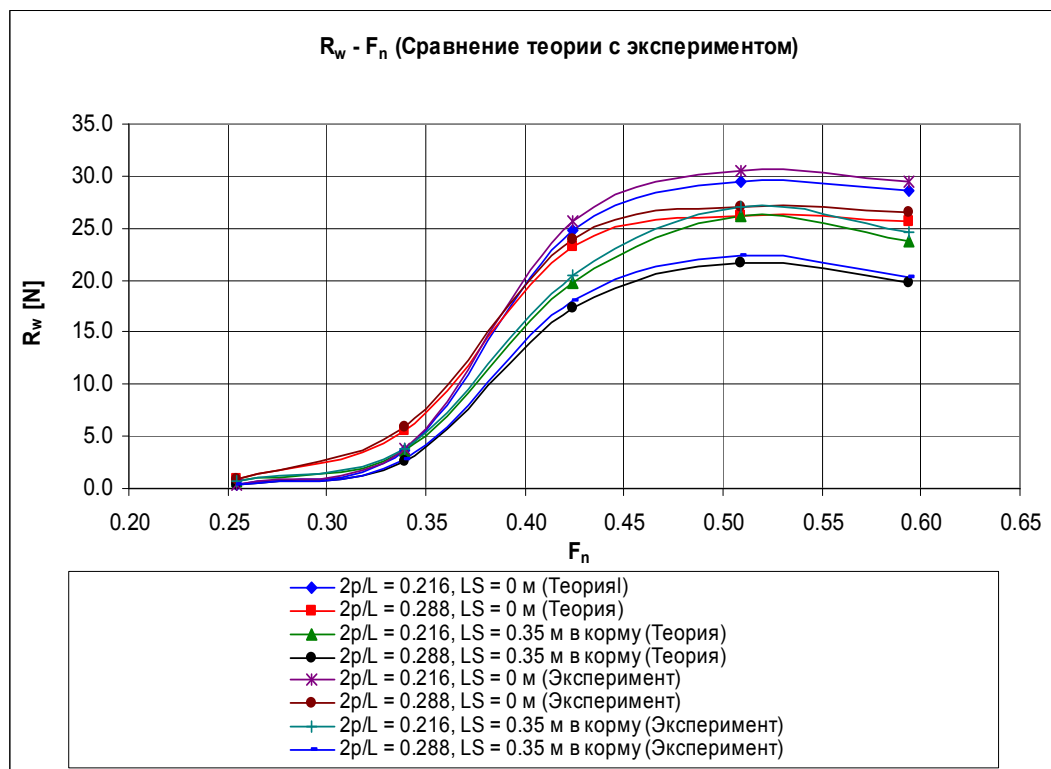
F_n	Экспериментальный коэффициент волнового сопротивления R_w [N] (Исследования 1 - 4)			
	$2p/L = 0.216,$ $LS = 0 \text{ м}$	$2p/L = 0.288,$ $LS = 0 \text{ м}$	$2p/L = 0.216,$ $LS = 0.35 \text{ м в}$ корму	$2p/L = 0.288,$ $LS = 0.35 \text{ м в}$ корму
0.255	0.377	0.901	0.645	0.319
0.339	3.799	5.805	3.816	2.770
0.424	25.640	23.948	20.366	17.958
0.509	30.479	27.058	27.027	22.323
0.594	29.432	26.436	24.561	20.321

Таблица 3.10 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления R_w [N]

F_n	Теоретический коэффициент волнового сопротивления R_w [N] (Исследования 1 - 4)			
	$2p/L = 0.216,$ $LS = 0 \text{ м}$	$2p/L = 0.288,$ $LS = 0 \text{ м}$	$2p/L = 0.216,$ $LS = 0.35 \text{ м Aft}$	$2p/L = 0.288,$ $LS = 0.35 \text{ м Aft}$
0.255	0.365	0.873	0.625	0.310
0.339	3.681	5.623	3.697	2.684
0.424	24.839	23.199	19.733	17.400
0.509	29.529	26.219	26.182	21.632
0.594	28.514	25.612	23.794	19.687

Таблица 3.11 – Различие (%) между теоретическими и экспериментальными значениями R_w и C_w

F_n	Различие (%) между экспериментом и теорией (R_w и C_w) (Исследование 1 - 4)			
	$2p/L = 0.216,$ $LS = 0 \text{ м}$	$2p/L = 0.288,$ $LS = 0 \text{ м}$	$2p/L = 0.216,$ $LS = 0.35 \text{ м в}$ корму	$2p/L = 0.288,$ $LS = 0.35 \text{ м в}$ корму
0.255	3.04	3.11	3.09	3.10
0.339	3.12	3.13	3.11	3.11
0.424	3.12	3.13	3.11	3.11
0.509	3.12	3.10	3.13	3.09
0.594	3.12	3.12	3.12	3.12

Рис. 3.8 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w Рис. 3.9 – Графики экспериментальных и теоретических значений R_w [N]

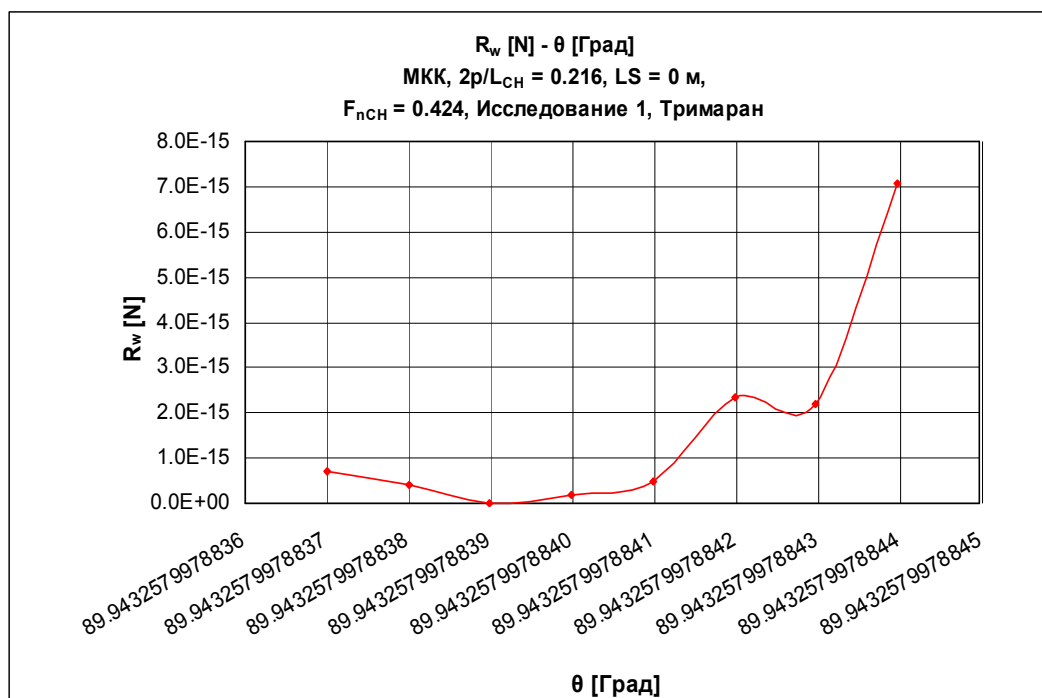


Рис. 3.10 – Характерная функция формы R_w [N], $2p/L_{CH} = 0.216$, $LS = 0$ м
 $F_{nCH} = 0.424$, Исследование 1

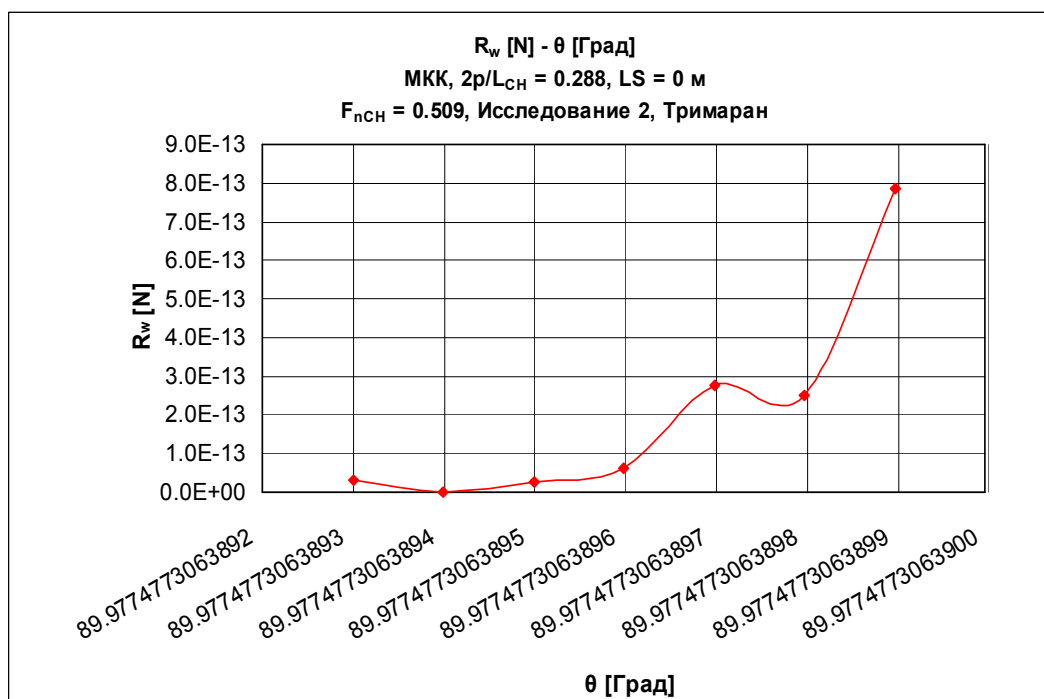


Рис. 3.11 – Характерная функция формы R_w [N], $2p/L_{CH} = 0.288$, $LS = 0$ м
 $F_{nCH} = 0.509$, Исследование 2

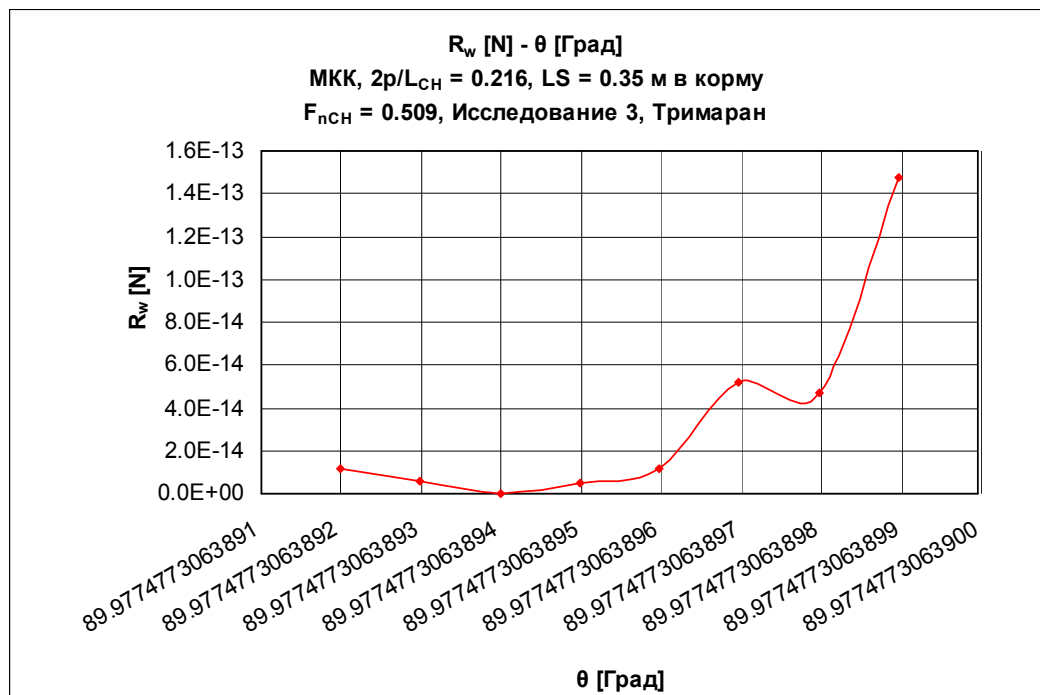


Рис. 3.12 – Характерная функция формы R_w [N], $2p/L_{CH} = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму
 $F_{nCH} = 0.509$, Исследование 3

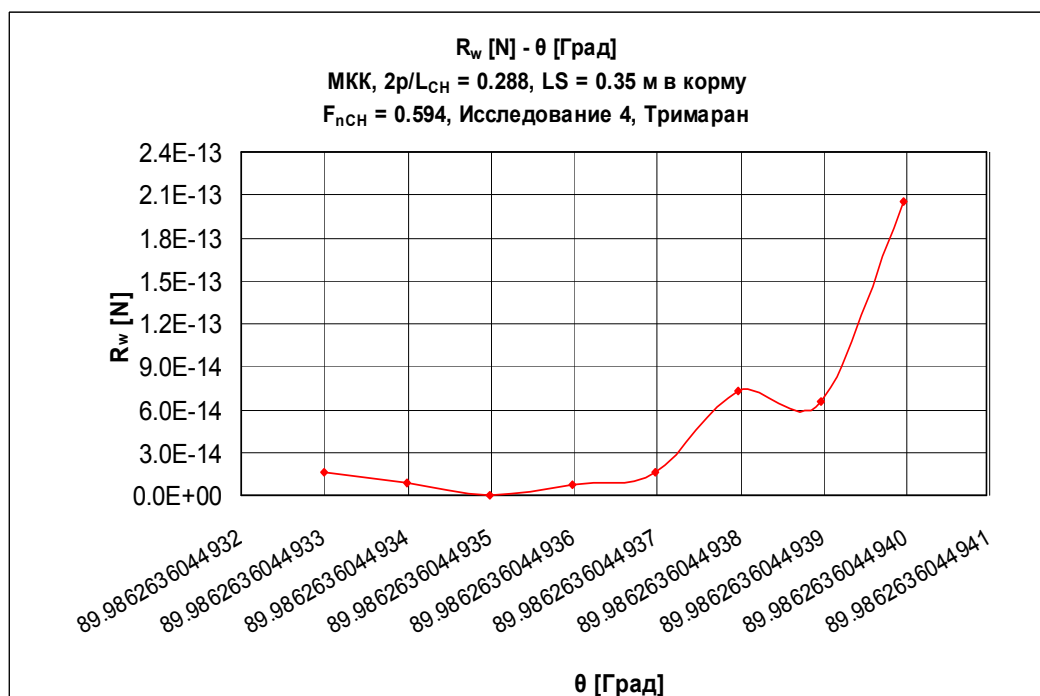


Рис. 3.13 – Характерная функция формы R_w [N], $2p/L_{CH} = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму
 $F_{nCH} = 0.594$, Исследование 4

Таблица 3.12 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления судна C_w
(Исследование 5)

F_{nSH}	F_{nCH}	$C_w \times 10^3$			
		МКК	LWT	MEM	MES
0.361	0.255	0.339	0.350	0.330	0.330
0.385	0.272	0.533	0.550	0.530	0.530
0.403	0.285	0.969	1.000	0.950	0.940
0.424	0.300	1.599	1.650	1.580	1.570
0.448	0.317	2.133	2.180	2.110	2.100
0.460	0.325	2.229	2.280	2.210	2.200
0.467	0.330	2.181	2.250	2.200	2.190
0.488	0.345	1.793	1.850	1.750	1.730
0.512	0.362	1.405	1.450	1.390	1.370
0.532	0.376	1.250	1.290	1.275	1.265
0.560	0.396	1.405	1.450	1.400	1.400
0.576	0.407	1.841	1.900	1.750	1.700
0.594	0.420	2.278	2.360	2.200	2.180

Таблица 3.13 – Теоретическое значение волнового сопротивления R_w [N]
(Исследование 5)

F_{nSH}	F_{nCH}	R_w [N]			
		МКК	LWT	MEM	MES
0.361	0.255	0.350	0.362	0.341	0.341
0.385	0.272	0.627	0.647	0.623	0.623
0.403	0.285	1.252	1.291	1.226	1.213
0.424	0.300	2.287	2.360	2.260	2.246
0.448	0.317	3.405	3.482	3.370	3.354
0.460	0.325	3.745	3.828	3.710	3.693
0.467	0.330	3.775	3.894	3.808	3.790
0.488	0.345	3.390	3.500	3.310	3.273
0.512	0.362	2.926	3.020	2.895	2.853
0.532	0.376	2.810	2.899	2.865	2.842
0.560	0.396	3.503	3.614	3.489	3.489
0.576	0.407	4.850	5.002	4.607	4.476
0.594	0.420	6.387	6.616	6.168	6.112

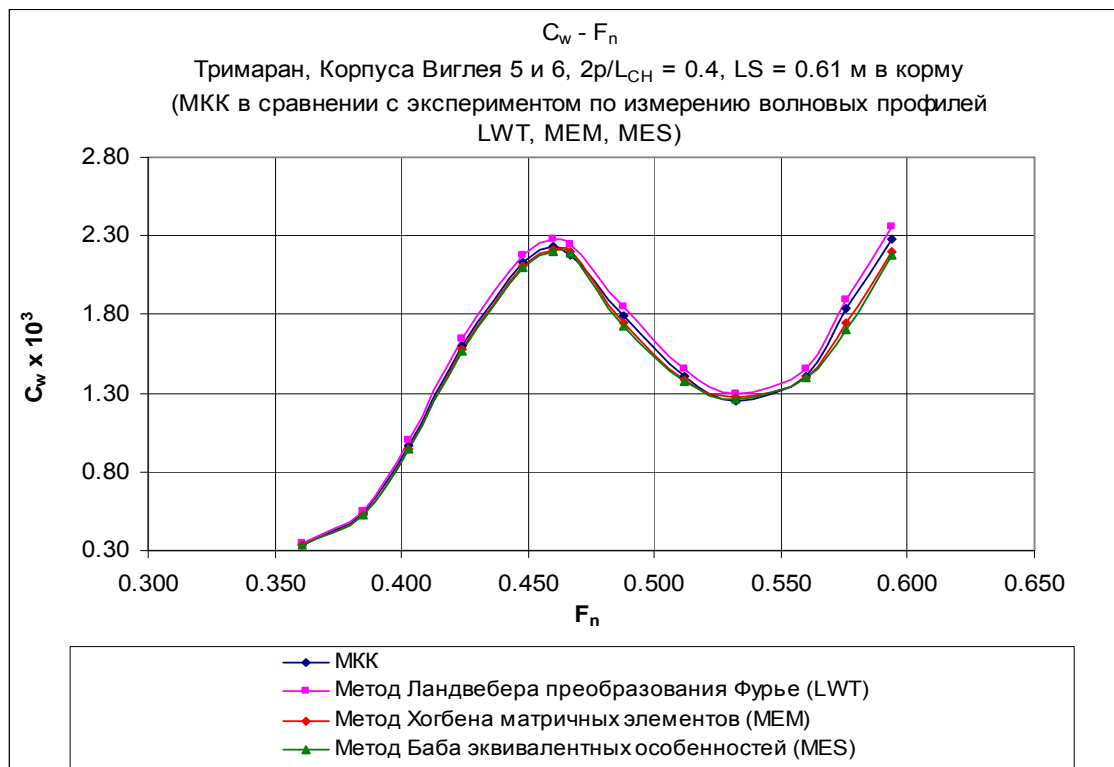


Рис. 3.14 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w (Исследование 5)

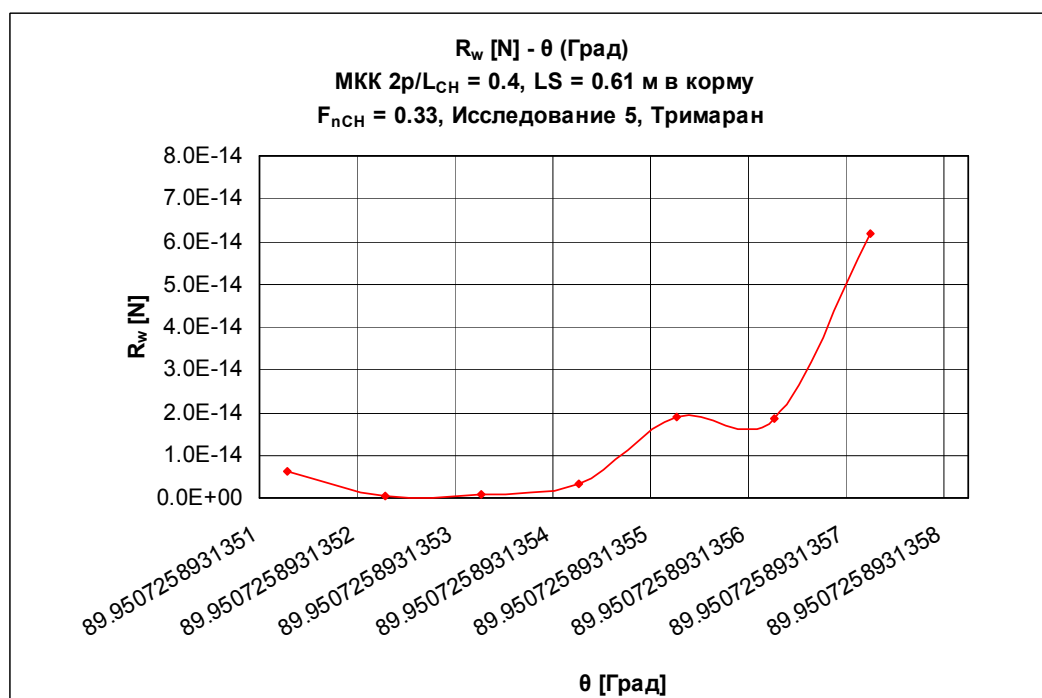


Рис. 3.15 – Характерная функция формы $R_w [N]$, $2p/L_{CH} = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму
 $F_{nCH} = 0.33$, Исследование 5

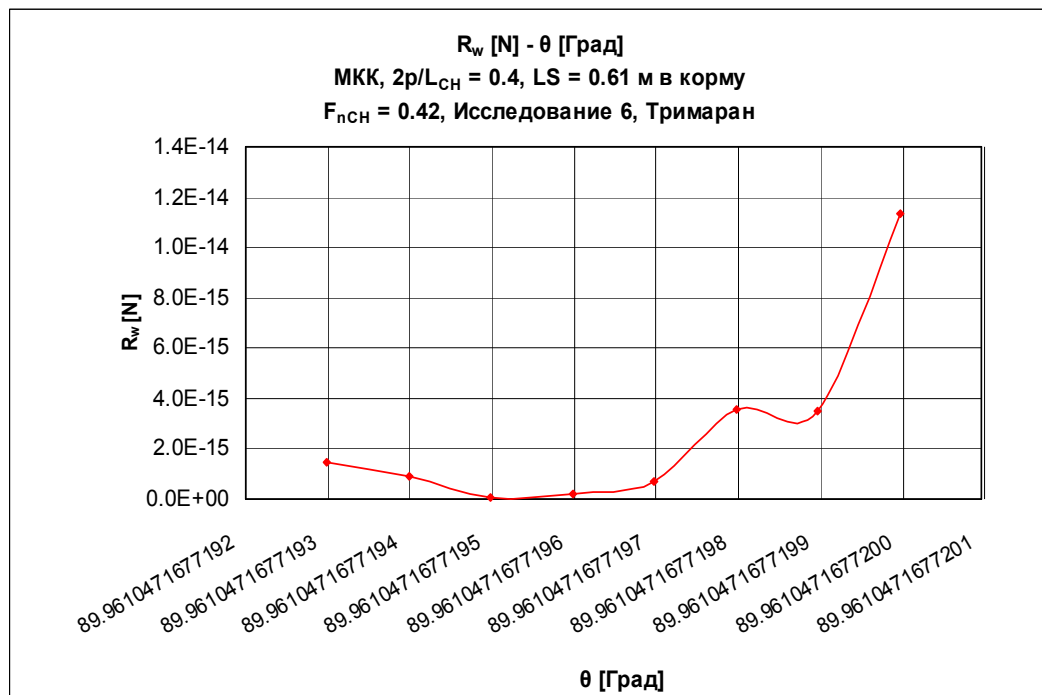


Рис. 3.16 – Характерная функция формы R_w [N], $2p/L_{CH} = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму
 $F_{nCH} = 0.42$, Исследование 6

Заметка: Расчетные данные по характерным функциям формы R_w [N], приведенным в виде графиков на Рис. 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.15, 3.16 приведены в Таблицах 3.24, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28 и 3.29 Приложения 5

ГЛАВА 4

4. ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

4.1 Основное уравнение. В этой главе сделана попытка исследовать изменение волнового сопротивления геометрически подобных судов в функции главных измерений b и d . Имеется возможность выполнить параметрическое исследование корпуса Виглея с применением основных формул Ньюмена для однокорпусных судов и Така-Лазаускаса для многокорпусных судов, приведенных в Главе 1, Главе 2 и Главе 3, в которых заложены зависимости от параметров формы корпуса и его основных размерений, а также от вариации конфигурации корпуса в случае катамаранов и тримаранов. Волновой интеграл для однокорпусных судов, данный Ньюменом в [9] и усовершенствованный в этом исследовании имеет вид;

$$R_w = (\pi \rho U^2) \int |A(\theta)|^2 \cos^3 \theta d\theta; 0 \leq \theta \leq \theta_{pmax}$$

$$A(\theta) = (2v/\pi) \sec^3 \theta \iint \eta_x \exp(v \sec^2 \theta z) \cos(v \sec \theta x) dz dx; d \leq z \leq 0, -L/2 \leq x \leq L/2$$

Подставляя волновую амплитудную функцию $A(\theta)$ в приведенный выше интеграл волнового сопротивления, можно получить усовершенствованный интеграл Мичеля-Виглея в виде;

$$R_w = (4\rho g^2/\pi U^2) \int \sec^3 \theta \left| \iint \eta_x \exp(v \sec^2 \theta z) \cos(v \sec \theta x) dz dx \right|^2 d\theta; 0 \leq \theta \leq \theta_{pmax}$$

$$I_{CP} = \iint \eta_x \exp(v \sec^2 \theta z) \cos(v \sec \theta x) dz dx; d \leq z \leq 0, -L/2 \leq x \leq L/2$$

Записанный выше интеграл I_{CP} может быть переписан в более простой форме, обнаруживающей зависимость от параметров формы корпуса, которая может рассматриваться как основное выражение для проведения исследования возможности оптимизации формы корпуса с целью минимизации волнового сопротивления ;

$$I_{CP} = bd \iint ([y(x_n, z_n) - y(x_{n-1}, z_{n-1})]/\delta \zeta) \exp(-dg \zeta \sec^2 \theta/U^2) \cos(\ell g \zeta \sec \theta/U^2) \delta \zeta \delta \zeta;$$

$$-1 \leq \zeta \leq 1, 0 \leq \zeta \leq 1$$

$$= bd \iint [y(x_n, z_n)/\delta \zeta] \exp(-dg \zeta \sec^2 \theta/U^2) \cos(\ell g \zeta \sec \theta/U^2) \delta \zeta \delta \zeta$$

$$- bd \iint [y(x_{n-1}, z_{n-1})/\delta \zeta] \exp(-dg \zeta \sec^2 \theta/U^2) \cos(\ell g \zeta \sec \theta/U^2) \delta \zeta \delta \zeta; -1 \leq \zeta \leq 1, 0 \leq \zeta \leq 1$$

$$y = (B/2)(1-\zeta^2)(1-\zeta^2); \text{ Уравнение полуширины корпуса, } \zeta = 2x/L, \zeta = z/d,$$

$$\eta = y/b, \text{ Нижний индекс } CP - \text{ относится к диаметральной плоскости}$$

Как легко видеть $A(\theta)$ прямо пропорционально полуширине $b = B/2$ или ординате полукорпуса y и глубине d или осадке T (в этом случае $T = d$), то есть параметрам, определяющим геометрию корпуса.

4.2 Параметрические исследования. С учетом основного уравнения, приведенного в параграфе 6.1 и использования математически определенной формы корпуса Виглея, изменение полуширины b или $B/2$ приводит к изменению наклона поверхности корпуса и, следовательно, к пропорциональному изменению волновой амплитуды. Аналогичным образом, изменение глубины d или осадки T корпуса оказывает влияние на волновую амплитуду и, таким образом, на волновое сопротивление. Нижеследующие случаи параметрических исследований по однокорпусному, двухкорпусному и трехкорпусному судну рассмотрены в этой главе с целью исследования влияния параметров формы судна на волновое сопротивление с учетом результатов, полученных в предыдущих исследованиях в Главе 1, Главе 2 и Главе 3 соответственно. Результаты параметрического анализа дают полезные представления о том, как оптимизировать форму судна для минимизации волнового сопротивления. Кроме того, данные по волновому сопротивлению могут быть интерполированы для получения значений волнового сопротивления и его коэффициента при различных значениях параметров формы корпуса; полуширины b , глубины d , а также вариации этих величин. Данные параметрического исследования для однокорпусных, двухкорпусных и трехкорпусных судов, полученные в данной Главе приведены в приведенной ниже Таблице 4.1.

Главные размерения и параметры формы моделей с корпусом Виглея

Корпус Виглея 1

Длина между перпендикулярами, L_{BP}	- 1.8 м
Длина по ватерлинии, L_{WL}	- 1.8 м
Глубина d или осадка T	- 0.1125 м
Ширина по ватерлинии, B_{WL}	- 0.18 м
Водоизмещение, Δ	- 16.2 кг
Площадь см. поверх., S при T	- 0.482 м ²

Длина между перпендикулярами, L_{BP}	- 2.5 м
Длина по ватерлинии, L_{WL}	- 2.5 м
Глубина d или осадка T	- 0.1547 м
Ширина по ватерлинии, B_{WL}	- 0.25 м
Водоизмещение, Δ	- 30.9 кг
Площадь см. поверх., S при T	- 0.921 м ²

4.3 Параметрическое исследование для однокорпусных судов. Параметрические исследования для однокорпусных судов выполнялись при вариации полуширины $b = B/2$ и глубины d . Результаты представлены в Таблицах 4.2 - 4.3 и Рис. 4.1 - 4.2 на последующих страницах.

Table 4.1 – Варианты параметрических исследований

Параметры формы корпуса и конфигурации	Варианты параметрических исследований		
	Однокорпусное судно	Катамаран	Тримаран
b или d	0.9b, 0.7b, 0.5b	0.9b, 0.7b, 0.5b	0.9b, 0.7b, 0.5b
b и d (включительно)	0.9b and 0.9d 0.7b and 0.7d 0.5b and 0.5d	0.9b and 0.9d 0.7b and 0.7d 0.5b and 0.5d	0.9b and 0.9d 0.7b and 0.7d 0.5b and 0.5d
2p/L (2p м)		0.3 (0.54 м) 0.4 (0.72 м) 0.5 (0.90 м)	0.216 (0.54 м) 0.288 (0.72 м)
LS			0 м, 0.35 м в корму

Номенклатура: b – ширина, d – глубина или осадка Т, 2p – Поперечное расстояние между ДП корпусов (катамаран и тримаран), L – длина корпуса по ватерлинии, LS – продольный вынос мидель-шпангоута (только тримаран)

Таблица 4.2 – Теоретическое значение C_w при вариации b или d (однокорпусное судно)

F_n	$10^{-3} \times C_w$ МКК (Исследование 3 Усоверш. формула Ньюмена) - 1db	$10^{-3} \times C_w$ МКК (Исследование 3 Усоверш. формула Ньюмена) - 0.9db	$10^{-3} \times C_w$ МКК (Исследование 3 Усоверш. формула Ньюмена) - 0.7db	$10^{-3} \times C_w$ МКК (Исследование 3 Усоверш. формула Ньюмена) - 0.5db
0.30	0.845	0.684	0.414	0.211
0.40	2.599	2.105	1.273	0.650
0.50	3.824	3.097	1.874	0.956
0.60	4.471	3.622	2.191	1.118
0.70	4.435	3.593	2.173	1.109
0.80	4.296	3.480	2.105	1.074
0.90	4.160	3.370	2.039	1.040
1.00	4.056	3.286	1.988	1.014

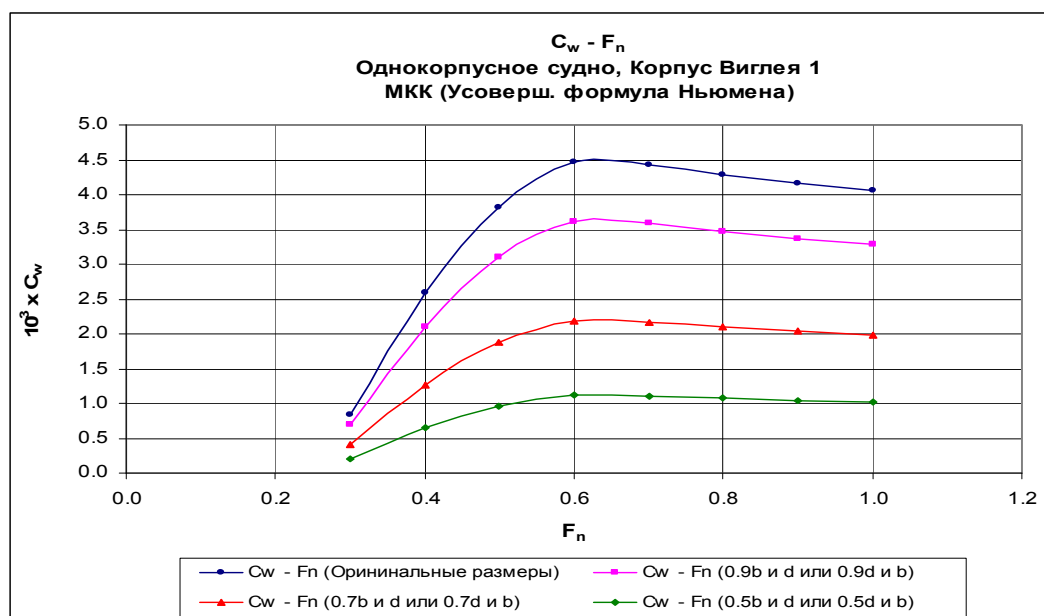
Рис. 4.1 – Графики теоретических значений C_w в функции числа Фруда F_n при вариации b или d (однокорпусное судно)

Таблица 4.3 – Теоретическое значение C_w при вариации b и d (однокорпусное судно)

F_n	$10^{-3} \times C_w$ МКК (Исследование 3 Усоверш. формула Ньюмена) - 1db	$10^{-3} \times C_w$ МКК (Исследование 3 Усоверш. формула Ньюмена) - 0.81db	$10^{-3} \times C_w$ МКК (Исследование 3 Усоверш. формула Ньюмена) - 0.49db	$10^{-3} \times C_w$ МКК (Исследование 3 Усоверш. формула Ньюмена) - 0.25db
0.30	0.845	0.554	0.203	0.053
0.40	2.599	1.705	0.624	0.162
0.50	3.824	2.509	0.918	0.239
0.60	4.471	2.934	1.074	0.279
0.70	4.435	2.910	1.065	0.277
0.80	4.296	2.818	1.031	0.268
0.90	4.160	2.730	0.999	0.260
1.00	4.056	2.661	0.974	0.254

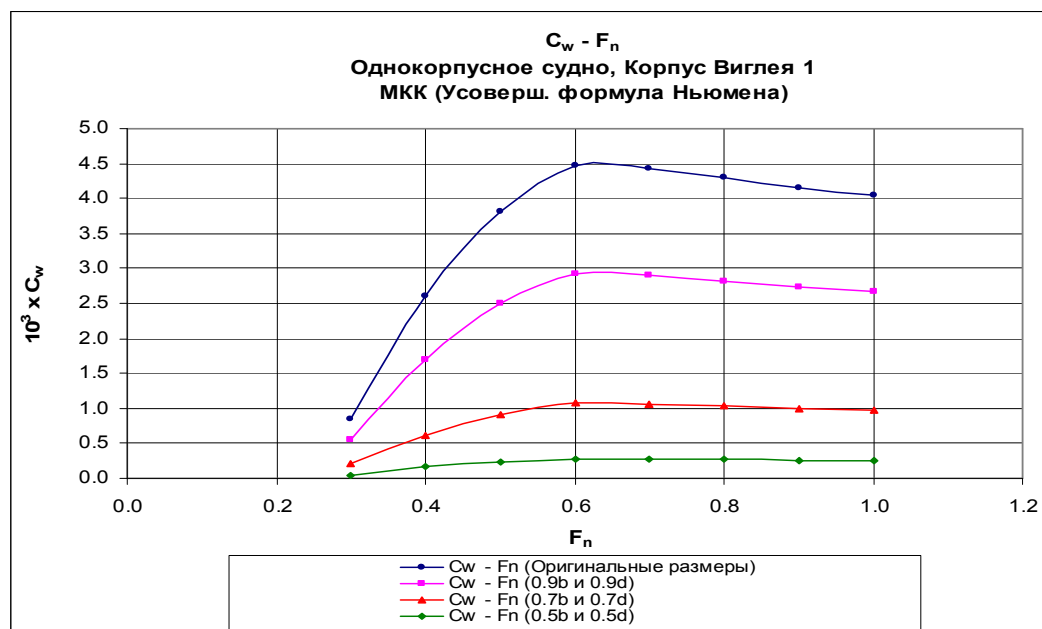


Рис. 4.2 – Графики теоретических значений R_w от F_n при вариации b и d (однокорпусное судно)

4.4 Параметрические исследования для катамаранов. Параметрический анализ влияния конфигурации катамарана на оптимизация волнового сопротивления основан на теоретическом анализе Главы 4, а итоговые результаты представлены в этой Главе как показано в Таблицах 4.4 - 4.10 и Рис. 4.3 - 4.9, где расчеты проведены при значениях $2p/L$, равных 0.3, 0.4 и 0.5. Для других значений $2p/L$ результаты можно получить экстраполяцией данных, приведенных ниже или посредством повторения вычислений по формуле Така-Лазаускаса при варьировании $2p/L$ в выражении для коэффициента взаимодействия корпусов $NIF_T(\theta)$.

Усовершенствованная формула (интеграл) Така-Лазаускаса для вычисления волнового сопротивления катамарана имеет вид;

$$R_w = (\pi \rho U^2) \int |A(\theta)_{CP}|^2 HIF_T(\theta) \cos^3 \theta d\theta; 0 < \theta < \theta_{\max}$$

$$HIF_T(\theta) = 4 \cos^2 [0.5(2p/L) \sin \theta / (Fn^2 \cos^2 \theta)]$$

Таблица 4.4 – Теоретические значения C_w при вариации $2p/L$ (катамаран, корпус Виглея 1)

F_n	Теоретические значения $10^3 \times C_w$		
	$2p/L=0.3$	$2p/L=0.4$	$2p/L=0.5$
0.30	1.5069	1.4326	1.6989
0.40	3.5988	3.6174	4.1219
0.50	6.1468	6.3977	6.1209
0.60	4.6315	4.4246	5.1478
0.70	3.5410	3.7217	4.5209
0.80	3.0671	3.5662	4.2025
0.90	3.0708	3.8249	4.1329
1.00	3.3497	3.7234	3.6440

Таблица 4.5 – Теоретические значения C_w при вариации b или d (Катамаран, $2p/L = 0.3$)

F_n	Теоретические значения $10^3 \times C_w$			
	$2p/L=0.3$ (Оригинальная форма корпуса)	$2p/L=0.3, 0.8b$ и d или $0.8d$ и b	$2p/L=0.3, 0.6b$ и d или $0.6d$ и b	$2p/L=0.3, 0.4b$ и d или $0.4d$ и b
0.30	1.507	0.964	0.542	0.241
0.40	3.599	2.303	1.296	0.576
0.50	6.147	3.934	2.213	0.983
0.60	4.632	2.964	1.667	0.741
0.70	3.541	2.266	1.275	0.567
0.80	3.067	1.963	1.104	0.491
0.90	3.071	1.965	1.106	0.491
1.00	3.350	2.144	1.206	0.536

Таблица 4.6 – Теоретические значения C_w при вариации b или d (Катамаран, $2p/L = 0.4$)

F_n	Теоретические значения $10^3 \times C_w$			
	$2p/L=0.4$ (Оригинальная форма корпуса)	$2p/L=0.4, 0.8b$ и d или $0.8d$ и b	$2p/L=0.4, 0.6b$ и d или $0.6d$ и b	$2p/L=0.4, 0.4b$ и d или $0.4d$ и b
0.30	1.433	0.917	0.516	0.229
0.40	3.617	2.315	1.302	0.579
0.50	6.398	4.095	2.303	1.024
0.60	4.425	2.832	1.593	0.708
0.70	3.722	2.382	1.340	0.595
0.80	3.566	2.282	1.284	0.571
0.90	3.825	2.448	1.377	0.612
1.00	3.723	2.383	1.340	0.596

Таблица 4.7 – Теоретические значения C_w
При вариации b или d (Катамаран, $2p/L = 0.5$)

F_n	Теоретические значения $10^3 \times C_w$			
	$2p/L=0.5$ (Оригинальная форма корпуса)	$2p/L=0.5, 0.8b$ и d или $0.8d$ и b	$2p/L=0.5, 0.6b$ и d или $0.6d$ и b	$2p/L=0.5, 0.4b$ и d или $0.4d$ и b
0.30	1.699	1.087	0.612	0.272
0.40	4.122	2.638	1.484	0.660
0.50	6.121	3.917	2.204	0.979
0.60	5.148	3.295	1.853	0.824
0.70	4.521	2.893	1.628	0.723
0.80	4.203	2.690	1.513	0.672
0.90	4.133	2.645	1.488	0.661
1.00	3.644	2.332	1.312	0.583

Таблица 4.8 – Теоретические значения C_w
при вариации b и d (Катамаран, $2p/L = 0.3$)

F_n	Теоретические значения $10^3 \times C_w$			
	$2p/L=0.3$ (Оригинальная форма корпуса)	$2p/L=0.3$ $0.8b$ и $0.8d$	$2p/L=0.3$ $0.6b$ и $0.6d$	$2p/L=0.3$ $0.4b$ и $0.8d$
0.30	1.507	0.617	0.195	0.039
0.40	3.599	1.474	0.466	0.092
0.50	6.147	2.518	0.797	0.157
0.60	4.632	1.897	0.600	0.119
0.70	3.541	1.450	0.459	0.091
0.80	3.067	1.256	0.397	0.079
0.90	3.071	1.258	0.398	0.079
1.00	3.350	1.372	0.434	0.086

Таблица 4.9 – Теоретические значения C_w
при вариации b и d (Катамаран, $2p/L = 0.4$)

F_n	Теоретические значения $10^3 \times C_w$			
	$2p/L=0.4$ (Оригинальная форма корпуса)	$2p/L=0.4$ $0.8b$ и $0.8d$	$2p/L=0.4$ $0.6b$ и $0.6d$	$2p/L=0.4$ $0.4b$ и $0.4d$
0.30	1.433	0.587	0.186	0.037
0.40	3.617	1.482	0.469	0.093
0.50	6.398	2.621	0.829	0.164
0.60	4.425	1.812	0.573	0.113
0.70	3.722	1.524	0.482	0.095
0.80	3.566	1.461	0.462	0.091
0.90	3.825	1.567	0.496	0.098
1.00	3.723	1.525	0.483	0.095

Таблица 4.10 – Теоретическое значение C_w
При вариации b и d (Катамаран, $2p/L=0.5$)

F_n	Теоретические значения $10^3 \times C_w$			
	$2p/L=0.5$ (Оригинальная форма корпуса)	$2p/L=0.5$ $0.8b$ и $0.8d$	$2p/L=0.5$ $0.6b$ и $0.6d$	$2p/L=0.5$ $0.4b$ и $0.4d$
0.30	1.699	0.696	0.220	0.043
0.40	4.122	1.688	0.534	0.106
0.50	6.121	2.507	0.793	0.157
0.60	5.148	2.109	0.667	0.132
0.70	4.521	1.852	0.586	0.116
0.80	4.203	1.721	0.545	0.108
0.90	4.133	1.693	0.536	0.106
1.00	3.644	1.493	0.472	0.093

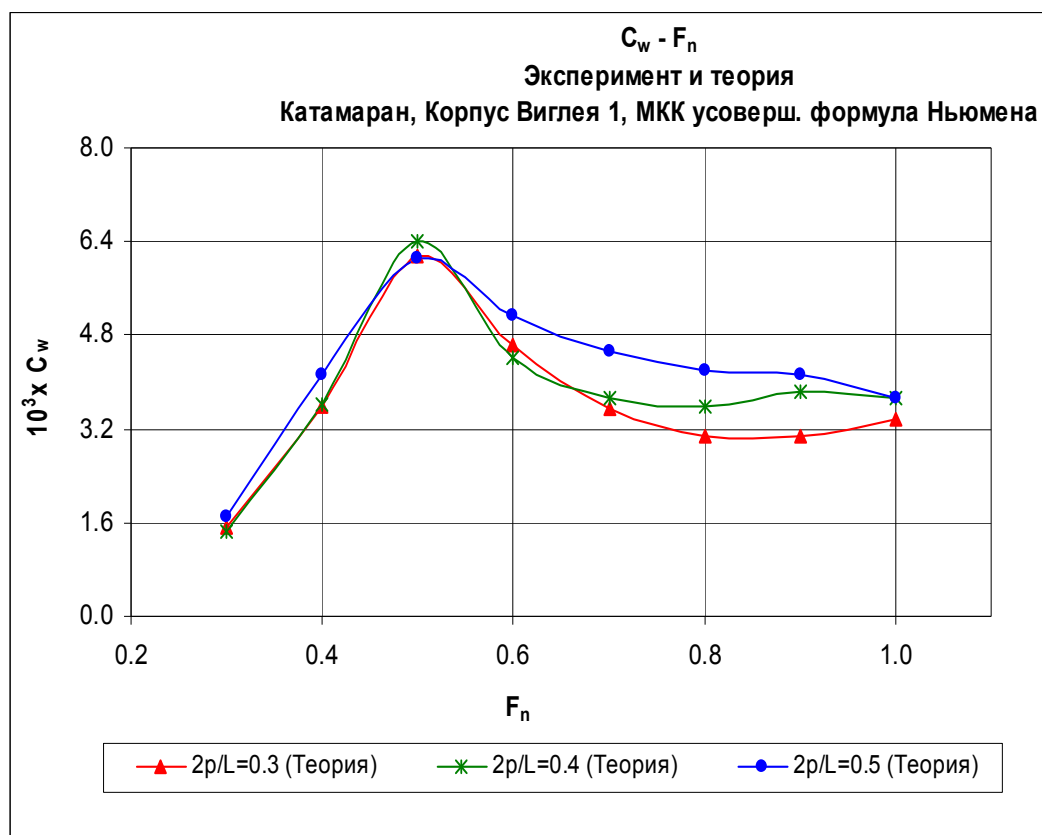


Рис. 4.3 – Графики теоретических значений C_w
при вариации $2p/L$ (Катамаран, корпус Виглея 1)

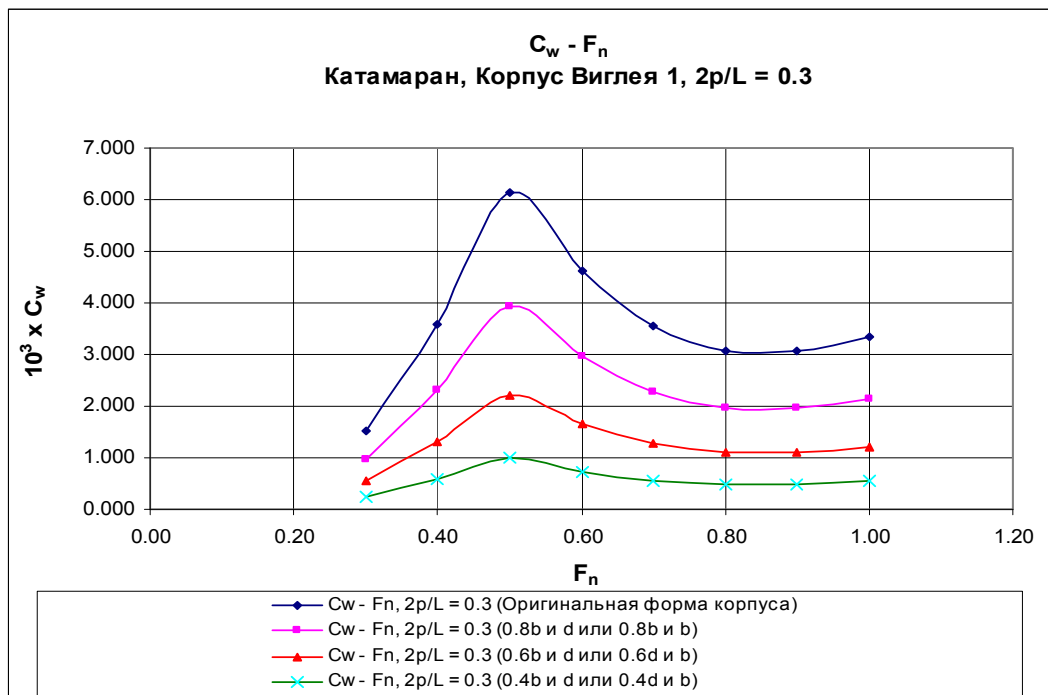


Рис. 4.4 – Графики теоретических значений C_w при вариации b или d (катамаран, $2p/L = 0.3$)

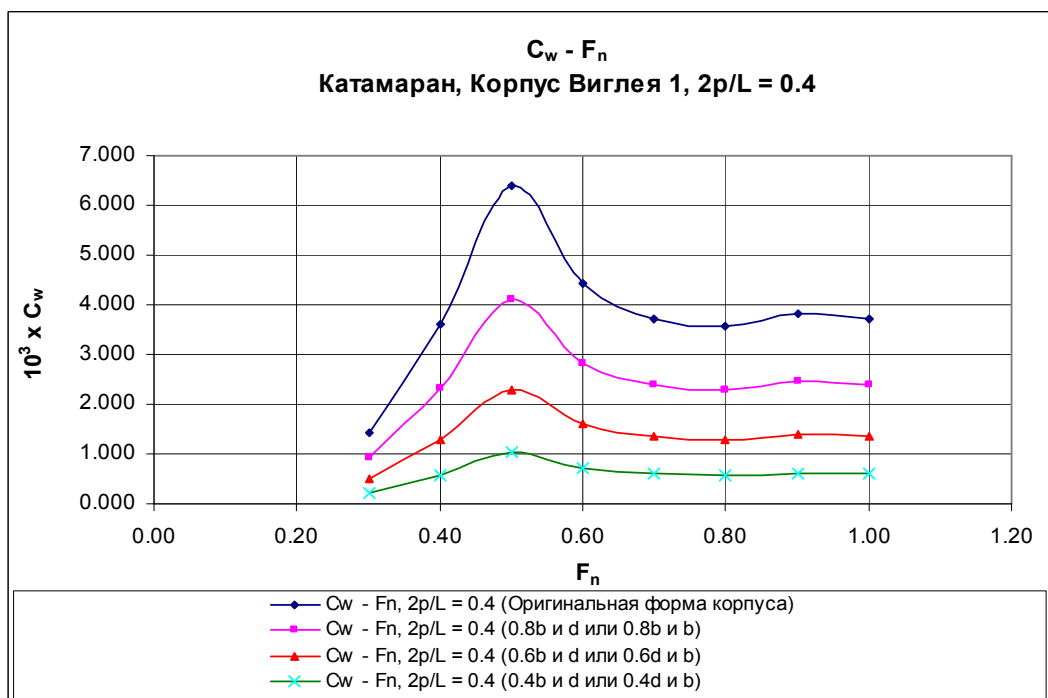


Рис. 4.5 – Графики теоретических значений C_w При вариации b или d (Катамаран, $2p/L = 0.4$)

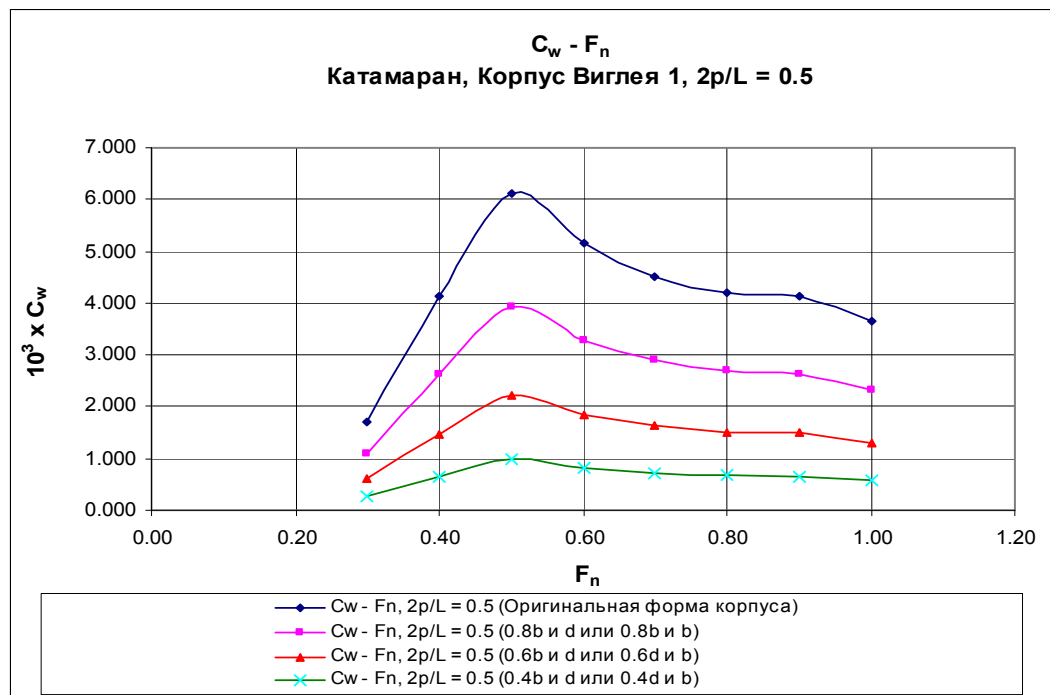


Рис. 4.6 – Графики теоретических значений C_w
При вариации b или d (Катамаран, $2p/L = 0.5$)

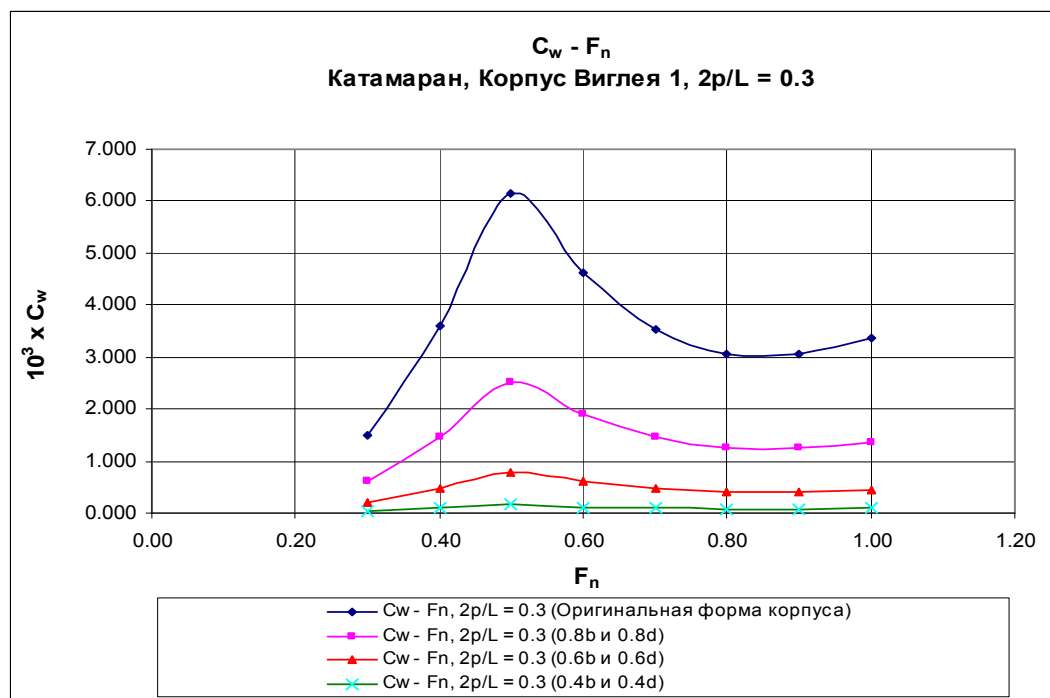


Рис.4.7 – Графики теоретических значений C_w
При вариации b и d (Катамаран, $2p/L = 0.3$)

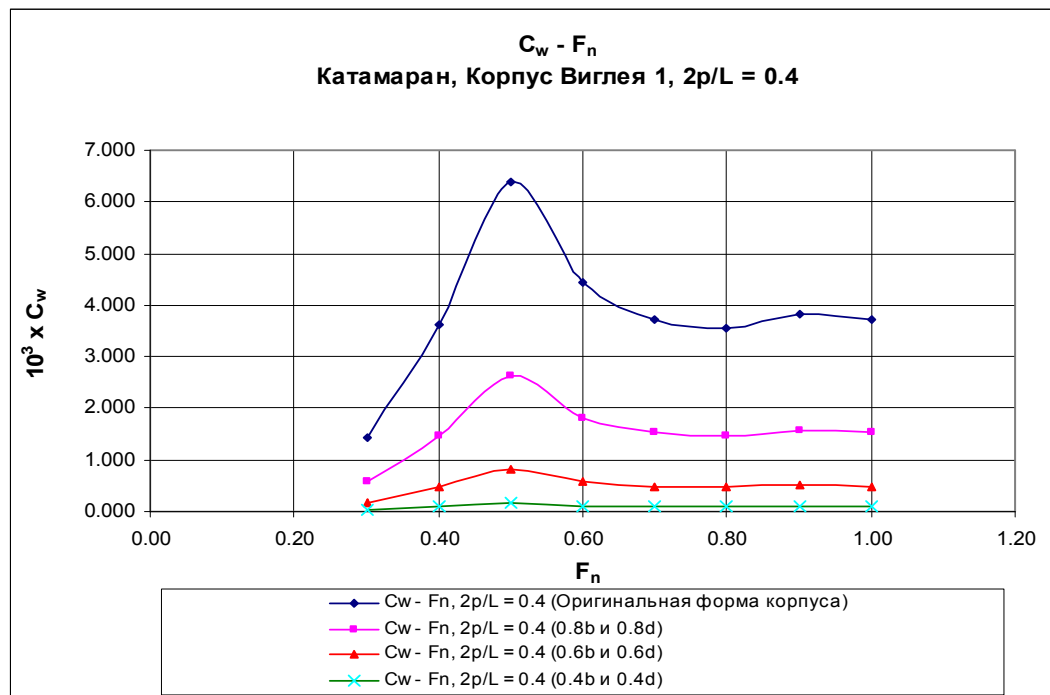


Рис. 4.8 – Графики теоретических значений C_w
При вариации b и d (Катамаран, $2p/L = 0.4$)

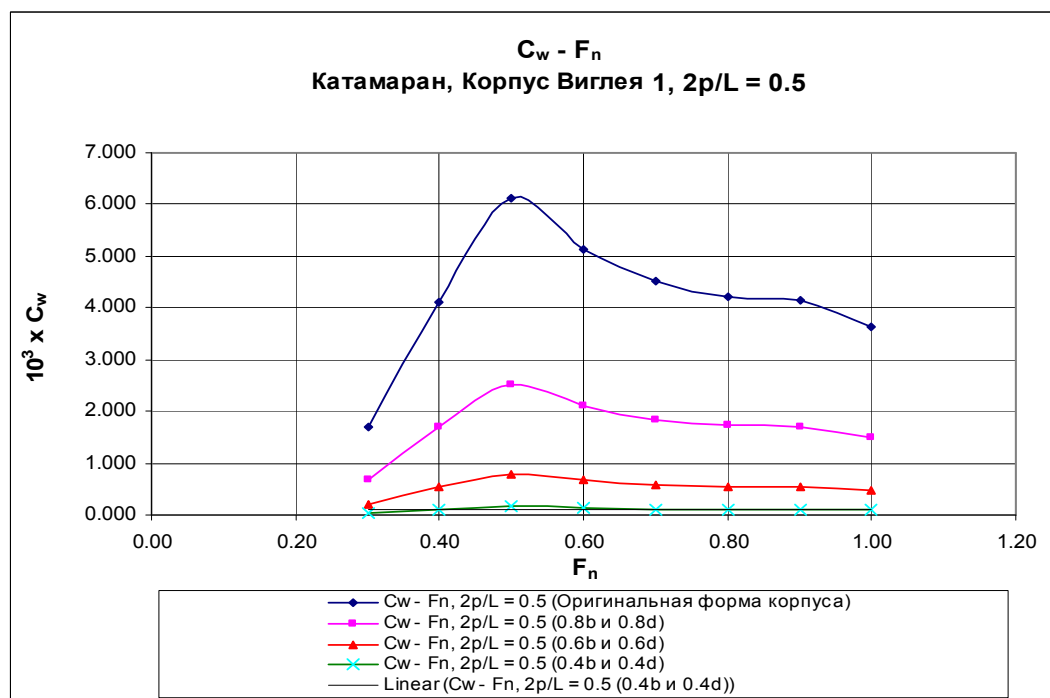


Рис. 4.9 – Графики теоретических значений C_w
при вариации b и d (катамаран, $2p/L = 0.5$)

4.5 Параметрические исследования для тримаранов. Теоретический анализ и результаты для тримаранов Главы 3 предоставляют методы и процедуры для систематического изучения изменений волнового сопротивления при изменении конфигурации. Опираясь на результаты, приведенные в Таблицах 4.11 - 4.15 и на Рис. 4.10 - 4.14, можно экстраполировать значения волнового сопротивления судна для других значений $2p/L$ и продольного выноса LS , основанные на результатах приведенных ниже или повторяя расчеты по усовершенствованной формуле Така-Лазаускаса при вариации $2p/L$ и LS в выражениях для коэффициентов поперечного и продольного взаимодействия корпусов $HIF_T(\theta)$ и $HIF_L(\theta)$ соответственно.

$$R_w = 2(\pi \rho U^2 / 2) \int |A(\theta)_{CP}|^2 HIF_T(\theta) HIF_L(\theta) \sec^3 \theta d\theta; 0 < \theta < \theta_{pmax}$$

$$HIF_T(\theta) = \cos^2[0.5(2p/L)\sin\theta/(Fn^2\cos^2\theta)]$$

$$HIF_L(\theta) = \cos^2(gLS/U^2\cos(\theta))$$

Таблица 4.11 – Теоретические значения C_w тримарана при вариации $2p/L$

F_n	Теоретический коэффициент волнового сопротивления, $C_w \times 10^3$			
	$2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м	$2p/L = 0.288$, $LS = 0$ м	$2p/L = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму	$2p/L = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму
0.255	0.245	0.585	0.419	0.207
0.339	1.388	2.120	1.394	1.012
0.424	5.992	5.596	4.760	4.197
0.509	4.946	4.392	4.386	3.623
0.594	3.509	3.152	2.928	2.423

Таблица 4.12 – Теоретические значения C_w при вариации b и d
(Тримаран, $2p/L=0.216$, $LS = 0$ м)

F_n	Теоретический коэффициент волнового сопротивления $C_w \times 10^3$ $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м			
	Оригинальная форма корпуса	$0.9B_{CH}$, $0.9d_{CH}$ $0.9B_{SH}$, $0.9d_{SH}$	$0.7B_{CH}$, $0.7d_{CH}$ $0.7B_{SH}$, $0.7d_{SH}$	$0.5B_{CH}$, $0.5d_{CH}$ $0.5B_{SH}$, $0.5d_{SH}$
0.255	0.245	0.198	0.120	0.061
0.339	1.388	1.124	0.680	0.347
0.424	5.992	4.853	2.936	1.498
0.509	4.946	4.006	2.424	1.237
0.594	3.509	2.842	1.719	0.877

Таблица 4.13 – Теоретические значения C_w при вариации b и
(тримаран, $2p/L=0.288$, $LS = 0$ м)

F_n	Теоретический коэффициент волнового сопротивления $C_w \times 10^3$ $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ м			
	Оригинальная форма корпуса	$0.9B_{CH}$, $0.9d_{CH}$ $0.9B_{SH}$, $0.9d_{SH}$	$0.7B_{CH}$, $0.7d_{CH}$ $0.7B_{SH}$, $0.7d_{SH}$	$0.5B_{CH}$, $0.5d_{CH}$ $0.5B_{SH}$, $0.5d_{SH}$
0.255	0.585	0.474	0.287	0.146
0.339	2.120	1.717	1.039	0.530
0.424	5.596	4.533	2.742	1.399
0.509	4.392	3.557	2.152	1.098
0.594	3.152	2.553	1.544	0.788

Таблица 4.14 – Теоретическое значение C_w при вариации b и d
(Тримаран, $2p/L=0.216$, $LS = 0.35$ м в корму)

F_n	Теоретический коэффициент волнового сопротивления $C_w \times 10^3$ $2p/L = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму			
	Оригинальная форма корпуса	$0.9b_{CH}, 0.9d_{CH}$ $0.9b_{SH}, 0.9d_{SH}$	$0.7b_{CH}, 0.7d_{CH}$ $0.7b_{SH}, 0.7d_{SH}$	$0.5b_{CH}, 0.5d_{CH}$ $0.5b_{SH}, 0.5d_{SH}$
0.255	0.419	0.339	0.205	0.105
0.339	1.394	1.129	0.683	0.348
0.424	4.760	3.856	2.332	1.190
0.509	4.386	3.552	2.149	1.096
0.594	2.928	2.372	1.435	0.732

Таблица 4.15 – Теоретические значения C_w при вариации b и d
(тримаран, $2p/L=0.288$, $LS = 0.35$ м в корму)

F_n	Теоретические значения $C_w \times 10^3$ $2p/L = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму			
	Оригинальная форма корпуса	$0.9b_{CH}, 0.9d_{CH}$ $0.9b_{SH}, 0.9d_{SH}$	$0.7b_{CH}, 0.7d_{CH}$ $0.7b_{SH}, 0.7d_{SH}$	$0.5b_{CH}, 0.5d_{CH}$ $0.5b_{SH}, 0.5d_{SH}$
0.255	0.207	0.168	0.102	0.052
0.339	1.012	0.819	0.496	0.253
0.424	4.197	3.400	2.057	1.049
0.509	3.623	2.935	1.775	0.906
0.594	2.423	1.962	1.187	0.606

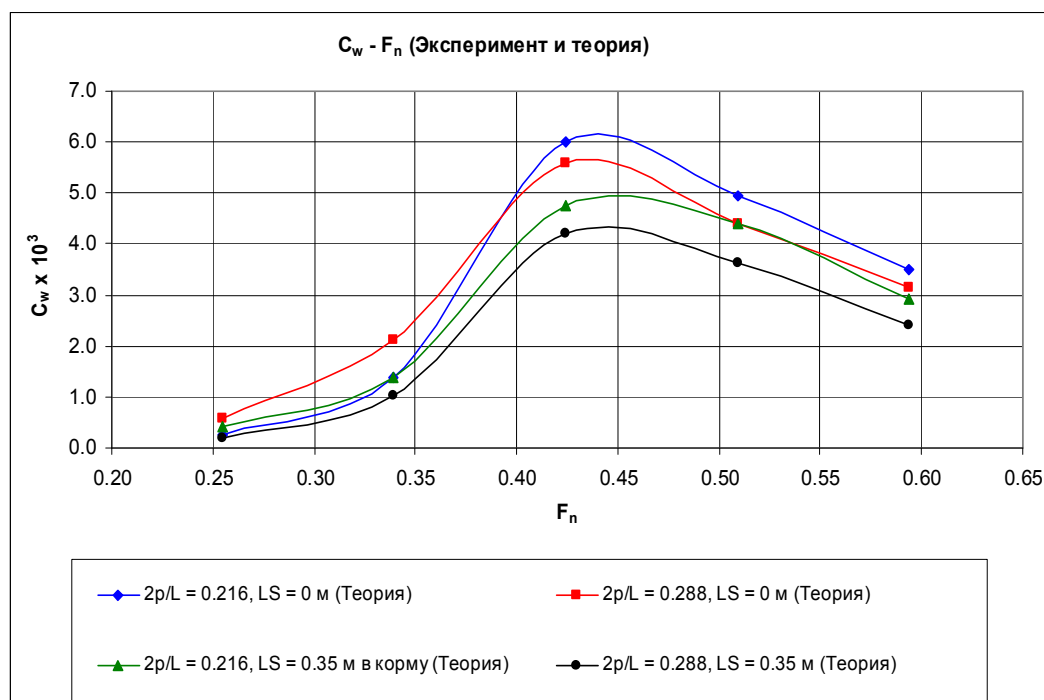


Рис. 4.10 – Графики теоретических значений C_w при вариации $2p/L$ (тримаран)

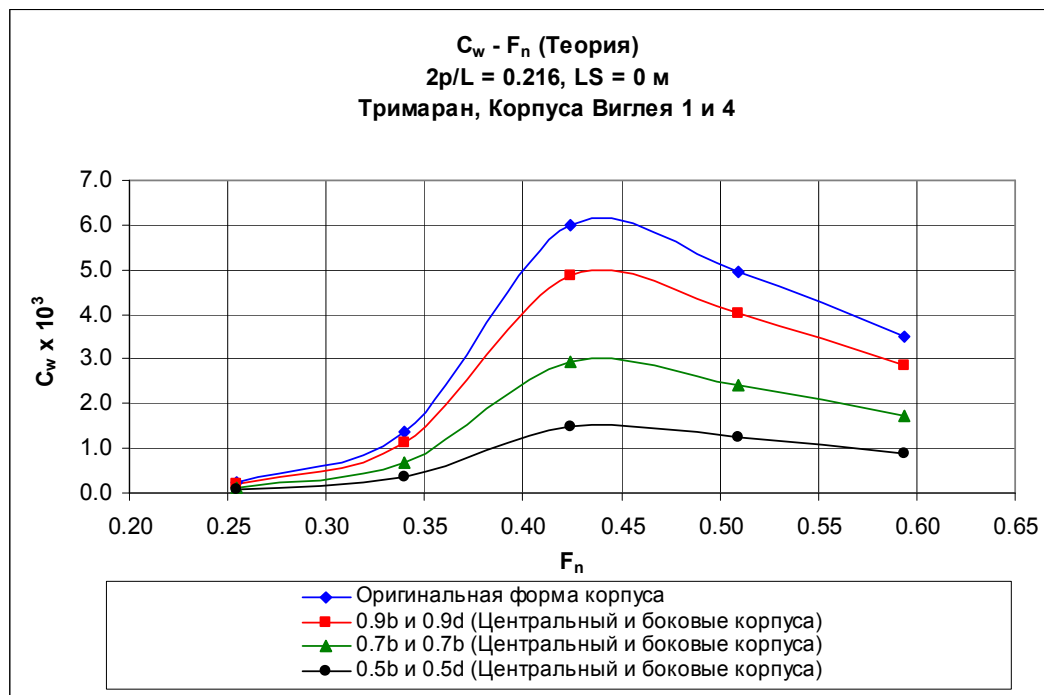


Рис. 4.11 – Графики теоретических значений C_w при вариации b и d (тримаран, $2p/L = 0.216, LS = 0$ м)

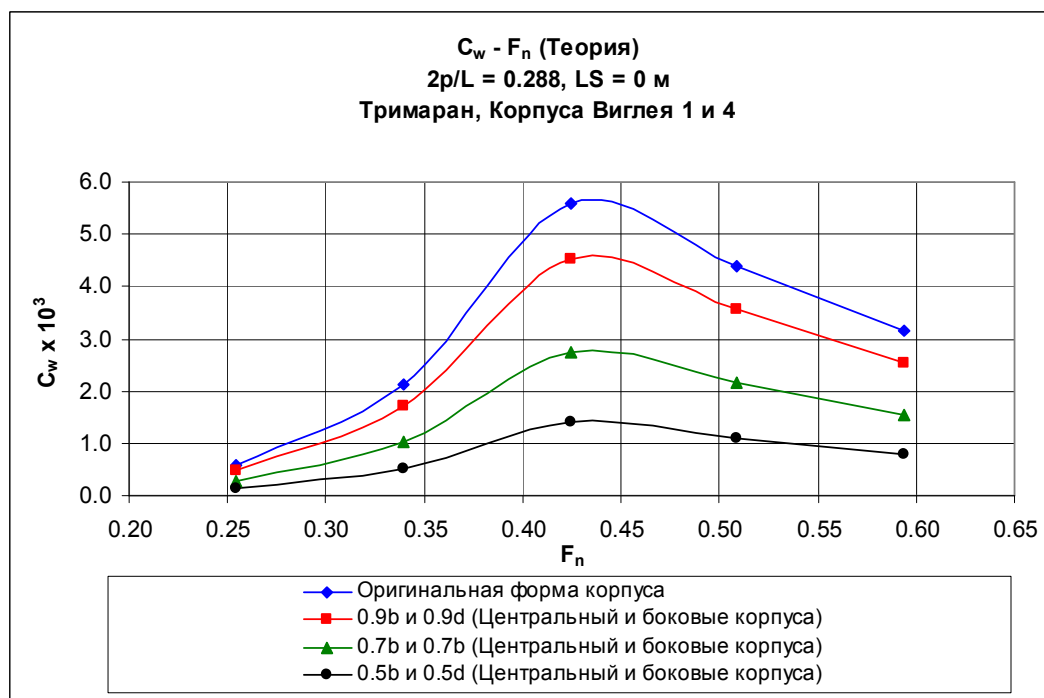


Рис. 4.12 – Графики теоретических значений C_w при вариации b и d (тримаран, $2p/L = 0.288, LS = 0$ м)

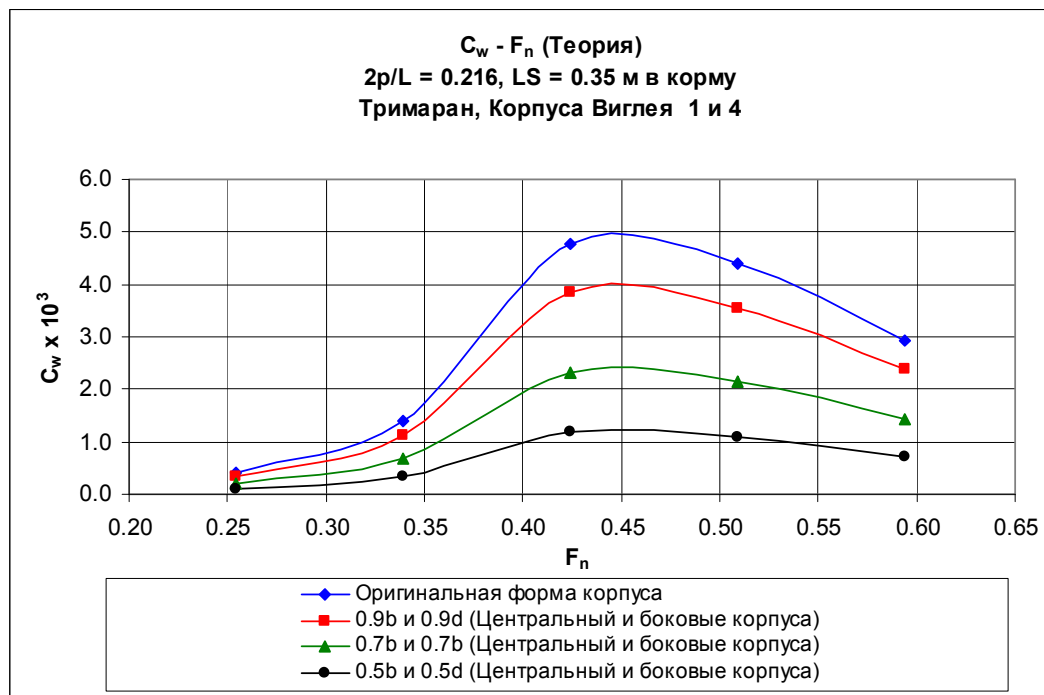


Рис. 4.13 – Графики теоретических значений C_w при вариации b и d (тримаран, $2p/L = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму)

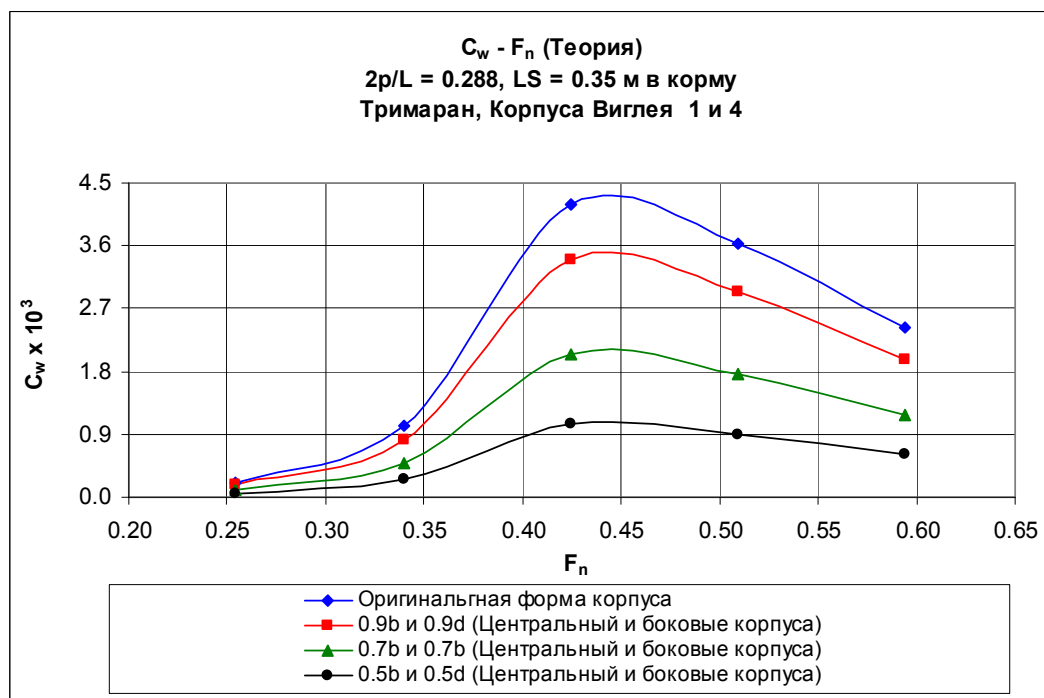


Рис. 4.14 – Графики теоретических значений C_w при вариации b и d (тримаран, $2p/L = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму)

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение, обратимся к оригинальным интегралам волнового сопротивления Мичеля-Виглея, Ньюмена и Така-Лазаускаса в сравнении с их усовершенствованными представлениями в виде определенных интегралов, вычисленных методом конечного корня (МКК) и примененных здесь для исследования волнового сопротивления однокорпусных, двухкорпусных и трехкорпусных судов.

Внешне, волновые интегралы Мичеля-Виглея и Ньюмена весьма схожи, хотя и отличаются видом используемых амплитудных функций $A(\theta)$ и соответствующими пределами интегрирования $0 < \theta < \pi/2$ and $-\pi/2 < \theta < \pi/2$. Можно предположить, что для заданной геометрии судна и его скорости мы, после интегрирования получим конечные цифровые значения волнового сопротивления. Однако, из-за наличия в этих интегралах тригонометрических функций $\sec\theta$, $\sec^2\theta$ and $\sec^3\theta$, попытка расчета этих интегралов при верхнем пределе $\theta = \pi/2$ приводит к бесконечным значениям интегралов, которые обнаруживают расхожимость. Конечно, можно попытаться вычислять эти интегралы различными приближенными методами, например, путем применения асимптотических методов посредством разложения подынтегральных функций в бесконечные ряды и пренебрежением слагаемыми высоких порядков или посредством применения асимптотических методов.

В работе [4] отмечено, в ряде случаев вычисления производились путем неоправданного отбрасывания мало бесконечно малой части промежутка вблизи верхнего предела интегрирования, что весьма дискуссионно. В этой связи главная задача, поставленная в настоящем исследовании состояла в поиске альтернативного надежного метода, позволяющего с приемлемой точностью вычислять волновое сопротивление однокорпусных, двухкорпусных и трехкорпусных судов, опираясь на классические интегралы волнового сопротивления судна и доверительные математические методы. В выполненном исследовании усовершенствованные формулы волнового сопротивления Мичеля-Виглея и Ньюмена удалось применить для однокорпусных судов реальной конфигурации, круглоскулых корпусов Национальной физической лаборатории (NPL), а также для описанных посредством конечных математических формул конфигураций корпуса Виглея с последующим сравнением полученных с существующими оригинальными работами, а также с работами, где использовались другие методы решения задачи. В последующем развитии данного исследования волновой интеграл Така-Лазаускаса был впервые применен в сочетании с интегралом Мичеля-Виглея для случая многокорпусных судов (катамаранов и тримаранов). Полученные результаты оказались весьма обнадеживающими и согласующимися с данными полученными на основе усовершенствованной формулы Така-Лазаускаса в комбинации с волновым интегралом Ньюмена для полукорпуса.

При проведении вычислений, принималось во внимание то обстоятельство, что подынтегральные функции осциллируют с высокой частотой и имеют бесконечное число корней. Применяя метод конечного корня, то есть используя в качестве верхнего предела интегрирования последний перед $\pi/2$ (конечный) корень, нам удалось избежать расхожимости интегралов. По существу, вместо $\pi/2$ мы ввели в рассмотрение максимальный угол распространения волн $\theta_{\text{рmax}}$, определяя его как конечный корень подынтегральной амплитудной функции $A(\theta)$. В итоге, как было показано в наших исследованиях, удалось получить теоретические значения волнового сопротивления весьма близкие к

экспериментальным данным при соответствующих значениях числа Фруда. Таким образом, введенное нами усовершенствование классических волновых интегралов состоит в замене верхнего предела интегрирования конечный корень θ_{rmax} вместо $\pi/2$.

Точное значение вышеупомянутого конечного корня θ_{rmax} было найдено для однокорпусного, двухкорпусного и трехкорпусного судов в главе 1, главе 2 и главе 3 соответственно. При этом расчет конечного корня подынтегральной функции проводился только в районе значений подынтегральной функции, соответствующих малой окрестности $\pi/2$. В ходе определения значений конечного корня θ_{rmax} выяснилось, что:

- Расчет подынтегральной функции в окрестности расположения конечного корня необходимо производить с очень мелкой сеткой по углу распространения волн θ ;
- Точное значение максимального угла распространения волн θ_{rmax} соответствует конечному корню подынтегральной функции, входящей в интеграл волнового сопротивления;
- Точное значение угла распространения волн θ_{rmax} устанавливает верхний предел интегрирования при вычислении интеграла волнового сопротивления судна посредством метода конечного корня;
- Между значением θ_{rmax} и $\pi/2$ никаких других корней не существует;
- Конечный корень θ_{rmax} определяется посредством процесса итераций на основе некоторых принятых начальных значений;
- θ_{rmax} соответствует подынтегральной функции в том месте оси θ , где наклон кривой испытывает скачок наклона от отрицательных значений к положительным (-ve to +ve) в последний раз перед уходом подынтегральной функции на бесконечность;
- Подынтегральная функция, входящая в волновой интеграл пропорциональна волновой амплитудной функции $A(\theta)$ и всегда имеет конечный корень.

Конечный корень θ_{rmax} весьма трудно определить стандартными методами нахождения корней алгебраического уравнения в силу специфики подынтегральной функции интеграла волнового сопротивления судна, обнаруживающей высокочастотные осцилляции и неограниченное возрастание вблизи $\pi/2$. Именно поэтому приходится применять процесс итераций при весьма мелком разбиении интервала по θ . Поведение подынтегральной функции интеграла волнового сопротивления судна по углу распространения волн иллюстрируется в данной работе в соответствующих главах.

Из соответствующих выражений для интеграла волнового сопротивления судна R_w для однокорпусного, двухкорпусного и трехкорпусного судна легко видеть, что подынтегральная функция пропорциональна квадрату волновой амплитудной функции $|A(\theta)|^2$, то есть диссипации волновой энергии генерируемой судном волновой системы. Рассчитанные значения $|A(\theta)|^2$ вблизи

конечных корней во всех исследованных случаях пренебрежимо малы, что оправдывает принятие θ_{rmax} в качестве верхнего предела интегрирования. Гипотетически, можно принять, что скорость диссипации волновой энергии при угле распространения волн, равном θ_{rmax} практически равна нулю.

Иллюстрации характерных подынтегральных функций в случаях однокорпусного, двухкорпусного и трехкорпусного судна можно найти в главе 1, главе 2 и главе 3 соответственно, что подтверждает правомочность применения метода конечного корня в усовершенствованных формулах для вычисления волнового сопротивления судна. Во всех этих случаях исследования наличие конечных корней очевидно при рассмотрении приведенных характерных подынтегральных функций. Теоретические (рассчитанные) значения волнового сопротивления судна и его коэффициента для трех конфигураций корпуса и соответствующих значений числа Фруда верифицированы теоретически и апробированы экспериментально, а также посредством сравнения с теоретическими работами других авторов.

Оригинальное выражение Така-Лазаускаса для вычисления волнового сопротивления многокорпусных судов обычно используется в комбинации с интегралом волнового сопротивления Ньюмена. В данной работе интеграл волнового сопротивления Така-Лазаускаса впервые применялся для двухкорпусных и трехкорпусных судов в комбинации с выражением для половины корпуса, фигурирующем в интеграле волнового сопротивления Мичеля-Виглея. Результаты, полученные в данном исследовании с применением оригинальных формул Ньюмена и Мичеля-Виглея обнаружили хорошее согласование для случая многокорпусных судов.

Параметрические исследования влияния формы корпуса и параметров конфигурации судна, приведенные в главе 6, представляют полезные процедуры и методологии, базирующиеся на основополагающих уравнениях и результатах анализа. При вариации основных размерений судна, а также параметров конфигураций, соответствующие данные по волновому сопротивлению можно получить путем интерполяции приведенных результатов.

Применение метода конечного корня при определении волнового сопротивления судна в сочетании с формулами Мичеля-Виглея, Ньюмена и Така-Лазаускаса оказалось весьма эффективным как для однокорпусных, так и для многокорпусных (катамаранов и тримаранов) судов. При этом, как уже отмечалось, конечный корень, соответствующий максимальному значению угла распространения волн θ_{rmax} использовался в качестве верхнего предела соответствующих интегралов волнового сопротивления. Теоретический анализ, выполненный для однокорпусных, двухкорпусных и трехкорпусных судов успешно верифицирован и апробирован экспериментально. При этом, как видно из соответствующих глав работы, как по волновому сопротивлению, так и по коэффициенту волнового сопротивления относительное различие теоретических и экспериментальных значений волнового сопротивления судна, как правило, незначительно.

Примененный в данной работе подход связан с обращением на новом этапе развития к классическим математическим формулировкам и интегралам для вычисления волнового сопротивления судов в приложении к весьма актуальным проблемам эффективного определения сопротивления однокорпусных и многокорпусных судов. На первый взгляд тривиальное усовершенствование классических интегралов волнового сопротивления, состоящее в представлении нового способа определения верхнего предела интегрирования, позволило

обеспечить устойчивость, точность и адекватность экспериментальным данным расчетов не только для «математических» корпусов, но и для реальных корпусов и конфигураций однокорпусных и многокорпусных судов. Процедуры определения максимального угла распространения волн θ_{max} , который и принимается за вышеупомянутый верхний предел интегрирования, достаточно трудоемки и требуют аккуратных итеративных вычислений, что в дальнейшем окупается простотой использования результатов.

Методика вычислений и процедуры интегрирования, используемые в настоящем исследовании, оказались весьма эффективными. Метод конечного корня, введенный в диссертации показал свою конкурентоспособность по сравнению с более сложными существующими методами, в частности, за счет удобства применения и приемлемой точности результатов. Этот метод, использующий конечный корень θ_{max} в качестве верхнего предела в интегралах волнового сопротивления удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными, полученными как автором этой диссертации, так и другими исследователями. В работе последовательно показано, что концепция линейной теории тонкого судна и в настоящее время является эффективным инструментом исследования и проектирования при использовании усовершенствованных интегралов волнового сопротивления и уточненных расчетных методик.

Научная новизна метода конечного корня, приложенного автором для определения волнового сопротивления судна состоит в следующем:

- МКК позволил получить определенный прорыв в расчете интегралов волнового сопротивления для однокорпусных и многокорпусных судов;
- МКК приводит к устойчивым и адекватным расчетным данным;
- МКК обеспечивает приемлемую точность при решении задач определения волнового сопротивления судна;
- МКК дает возможность переосмыслить классические результаты и применить усовершенствованные подходы к определению волнового сопротивления как неотъемлемой части процесса проектирования судна;
- Потенциально МКК может рассматриваться как полезный инженерный инструмент оптимизации формы и конфигурации однокорпусных и многокорпусных судов на стадии предварительного проектного синтеза;
- Параметрические расчеты, использующие МКК, дают основу для оценки волнового сопротивления геометрически подобных судов при соответствующих значениях числа Фруда;

Практические достоинства МКК состоят в следующем:

- МКК может использоваться при проведении исследования и проектирования исследовательскими центрами по судостроению, университетами, судостроительными проектными и производственными организациями, а также независимыми исследователями и проектантами;

- Основы МКК могут излагаться студентам и специалистам в программах обучения и повышения квалификации как элемент новых теоретических знаний в области волнового сопротивления судов;
- МКК может быть реализован в составе компьютерных программ и коммерческих пакетов для пользователей, занятых исследованиями и проектированием судов;
- МКК может использоваться при определении волновых структур (профилей), генерируемых при движении судна волновых систем;
- Параметрические расчеты с применением МКК могут использоваться для определения волнового сопротивления корпусов различных форм, конфигураций и размерений.

В заключение отметим, что, на наш взгляд, основные цели и задачи, поставленные в настоящем исследовании, успешно выполнены.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Resistance, Propulsion and Vibration, V. Lewis, SNAME, Principles of Naval Architecture 1988, Volume II, pp1-125.
- [2] A History of Ship Resistance Evaluation; Navigating the Wake of Past Efforts, Ada Gotman, the Journal of Ocean Technology, 2007, pp74-96.
- [3] The Wave Resistance of a Ship, J.H Michell, Philosophical Magazine, 1898, Volume 45, Ser.5, pp6–123.
- [4] Ship Wave Resistance, A Comparison of Mathematical Theory with Experimental Results, W.C.S Wigley, 67th Session of the Spring Meetings INA, 1926, pp124-141.
- [5] Ship Wave Resistance, Wigley W.C.S, Philosophical Magazine, Volume 45, 1898, Ser.5, pp106-123.
- [6] Calculated and Measured Wave Resistances for a Series of Forms Defined Algebraically, the Prismatic Coefficient and Angle of Entrance Being Varied Independently, W.C.S Wigley, Trans. INA, 1942, Volume 84, pp52-74.
- [7] Calculated and Observed Wave Resistances for a Series of Forms of Fuller Midsections, W.C.S Wigley and J.K Lunde, Trans. INA, 1948, Volume 90, pp92-110.
- [8] Wave Resistance in Deep Water Due to the Accelerated Motion of a Pressure System, RN Bhattacharya read by NR Sen FNI, Department of Mathematics, Jadavpur University, Calcutta, India, 1957, PNISIPS Vol 23A No3, pp191-198.
- [9] Marine Hydrodynamics, J.N Newman, The MIT Press, 1977, pp278 – 284.
- [10] An Evaluation of Mapping Procedures for the Stationary Ship Wave Problem K. Eggers, A. Gamst, Technische Universität Hamburg-Harburg, Germany, 1978, pp1-59.
- [11] Study of Total and Viscous Resistance for Wigley's Parabolic Hull Form, Sangseon Ju, Iowa Institute of Hydraulic Research, The Iowa University, USA, Office of Naval Research Contract No N00014-82-K-0069, 1983, pp1-38.
- [12] A Hybrid 3D Panel Method of Calculating Wave Making Resistance, V Aanesland, Norwegian Marine Technology Research Centre, Norway, 1986, pp5-8.
- [13] Wave Resistance Formula of JH Michell's and its Significance in Ship Hydrodynamics, E. O. Tuck, J. Austral. Math. Soc. Ser. B 30, 1989, pp365-377.
- [14] An Improved Method for the Theoretical Prediction of the Wave Resistance of Transom-Stern Hulls Using a Slender Body Approach Mr, P.R. Couser, Dr J.F. Wellicome and Dr A.F. Molland, Department of Ship Science University of Southampton, U.K. International Shipbuilding Progress, 45(444), December 1998, pp1-18.
- [15] Computation of Transient Nonlinear Ship Waves Using an Adaptive Algorithm, M. S. Celebi, Journal of Fluids and Structures (2000) 14, pp281-301.

- [16] Wave Patterns and Minimum Wave Resistance for High-Speed Vessels E. O. Tuck, D. C. Scullen and L. Lazauskas, 24th Symposium on Naval Hydrodynamics Fukuoka, JAPAN, 8-13 July 2002, pp1-16.
- [17] Study of Michell's Integral and Influence of Viscosity and Ship Hull Form on Wave Resistance, A. Sh. Gotman, Oceanic Engineering International, Volume 6, No. 2, 2002, pp74-115.
- [18] Artificial Boundary Method for Calculating the Ship Wave Resistance, Wen Xin & Han Houde, Department of Mathematical Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China, 2002, pp1-23.
- [19] The Experimental Determination of Wave Spectra and Wave Resistance from Measurements of the Wave Pattern Behind a Ship Model, Nastia Degiuli, Andreja Werner, Zdravko Doliner, XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium June 22-27, Croatia, 2003, pp1396-1401
- [20] Computational Research on Wave Making of Moving Wigley's Hull in Time Domain Computation of Nonlinear Waves, Yang Xiang-hui, Ye Heng-kui, Feng Da-kui, Liu Juan, Science Direct, Journal of Hydrodynamics, 2008. 20(4), pp469-476.
- [21] The Optimization of The Hull Form With the Minimum Wave Making Resistance Based on Rankine Source Method, Zhang Bao-ji, Ma Kun, Ji Zhuo-Shang, Science Direct, Journal of Hydrodynamics, 2009,21(2):277-284 DOI: 10.1016/S1001-6058(08)60146-8, pp277-284.
- [22] Ray Theory for Nonlinear Ship Waves and Wave Resistance, Bohyun Yim, Third International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Paris, 16-19 June 1981, pp1-19.
- [23] A Comparison of Experiment and Calculated Waves Profiles and Wave Resistance for a form Having Parabolic Waterlines, Wigley C, Proceedings of the Royal Society, London, 1934.
- [24] Effect of Viscosity on Waves Making of Ships, Wigley C, Trans. IEES, 1938.
- [25] CFD Prediction of the Wave Resistance of a Catamaran With Staggered Demihulls, Prasanta K. Sahoo, Lawrence J. Doctors, Luke Pretlove, International Conference on Marine Hydrodynamics 5-7 January 2006 (MAHY 2006), Visakhapatnam, India.
- [26] Calm Water Powering Predictions For High-Speed Catamarans, P.R. Couser, A.F. Molland, N.A. Armstrong, I.K.A.P. Utama, FAST '97, Sydney, Australia, 21st - 23rd July 1997.
- [27] A Perturbation Formulation of the Ship Wave Resistance problem, Jacek S. Pawlowski, 19th Symposium of Naval Hydrodynamics, 1992.
- [28] Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles, ODD M. Faltinsen, Norwegian University of Science and Technology, Cambridge University Press 2005, pp115-120.

- [29] Slender Body Theory to Nonlinear Ship Motions, Edwin J. Kreuser and Wolfgang M. Sichermann, Mechanics and Ocean Engineering, Hamburg University of Technology, Germany, XXI ICTAM, 15–21 August 2004, Warsaw, Poland.
- [30] Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles, ODD M. Faltinsen, Norwegian University of Science and Technology, Cambridge University Press, 2005, pp120-135.
- [31] Prediction of Wave-Making Resistance of Fast Ships in Shallow Water and Computer Program ShallowRes®, M. Hofman, Report BR01/2006, Department of Naval Architecture Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade.
- [32] Making Resistance Characteristics of Trimaran Hulls, Zafer Elcin, Wave Naval Postgraduate School, Monterey, California, Master of Science Thesis, December 2003.
- [33] Theory of Wave Motion of Liquids, Sretensky L.N., in Russian, Nauka, 1977.
- [34] Hydrodynamics of Ships in Shallow Water Basin A.M., Veledintsky I.O., Lakhovitsky A.G., in Russian, Sudostroenie, 1976.
- [35] Shallow Water and Supercritical Ships, Lakhovitsky A.G., Backbone publishing Company, 2007.
- [36] CFD Prediction of the Wave Resistance of a Catamaran With Staggered Demihulls, Prasanta K Sahoo, Lawrence J Doctors and Luke Pretlove, International Conference on Marine Hydrodynamics (MAHY), Visakhapatnam, India, 5-7 January 2006
- [37] Optimum Hull Spacing of a Family of Multi-hulls, E. O. Tuck and L. Lazauskas, Applied Mathematics Department, University of Adelaide, Australia, June 1998, pp1-38.
- [38] Study of Total and Viscous Resistance for the Wigley Parabolic Ship Form, Sangseon Ju, IIHR Report No. 261, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, April 1983.
- [39] A Three-Dimensional Linear Analysis of Steady Ship Motion in Deep Water, Job Johannes Maria Baar, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Brunel University, Uxbridge, United Kingdom, November 1986.
- [40] Computation of Nonlinear Ship Waves, S.W. Song, and R.E. Baddour, International Journal for Numerical Methods in Fluids, November 1989, pp139-142.
- [41] Campana E., Lalli F., Bulgarelli U. A numerical method for nonlinear free surface conditions in the wave resistance problem // Arch. Mech. 1989. V. 41. № 2-3. pp439-447.
- [42] Campana E., Lalli F., Bulgarelli U. A boundary element method for a non-linear free surface problem // Intern. J. Numer. Meth. Fluids. 1989. V. 9. № 10. pp1195-1206.
- [43] Campana E., Lalli F., Bulgarelli U. A numerical solution of the nonlinear wave resistance problem for simple shaped submerged bodies // Meccanica. 1990. V. 25. № 4. pp258-264.

- [44] M. Insel, A.F. Molland and J.F. Wellicome, Wave Resistance Prediction of a Catamaran by Linearised Theory, Proceedings of CAMO 94, 1994, pp59-67.
- [45] Hongxiang Peng, Numerical Computation of Multi-Hull Ship Resistance and Motion, PhD Thesis, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, June 2001, pp1-174
- [46] М.С. Камил, Применение метода конечного корня в линейной теории волнового сопротивления многокорпусных судов. однокорпусные суда, морские интеллектуальные технологии научный журнал № 3 (25) Т.1 2014, сс83-90.
- [47] М.С. Камил, Применение метода конечного корня в линейной теории волнового сопротивления многокорпусных судов. двухкорпусные суда, морские интеллектуальные технологии научный журнал № 3 (25) Т.1 2014, сс91-98.
- [48] М.С. Камил, Вычисление волнового сопротивления тримарана методом конечного корня, Морской Вестник № 4 (52) декабрь 2014 ISSN 1812-3694, сс117-119.
- [49] M.S. Kamil, M.P.A Ghani, A.M.A Malik, K.V. Rozhdestvenskiy, A Definite Integral Solution of Ship Wave Resistance for Twin-Hull Ships, World Maritime Technology Conference 2012 (WMTC2012), 29 May – 1 June 2012, Saint Petersburg, Russia.
- [50] M.S. Kamil, M.P.A Ghani, A.M.A Malik, K.V. Rozhdestvenskiy, Revitalizing the Theoretical Approach of Predicting Ship Wave Resistance, Marine Science and Technology Conference 2011 (MARSTEC2011), 12-13 September 2011, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [51] M.S. Kamil, M.P.A Ghani, A.M.A Malik, K.V. Rozhdestvenskiy, An Accurate Ship Wave Resistance of an Improved Michell-Wigley Equation, International Conference on Engineering Technology 2011, 6-8 December 2011, Kuala Lumpur, Malaysia, Serial Number 19. Marine Technology, ICET2011_25.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

R_T	- Полное сопротивление
R_R	- Остаточное сопротивление
R_F	- Сопротивление трения
R_{Ts}	- Полное сопротивление натурного судна
R_{Rs}	- Остаточное сопротивление натурного судна
R_{Fs}	- Сопротивление трения натурного судна
R_{Tm}	- Полное сопротивление модели судна
R_{Rm}	- Остаточное сопротивление модели
R_{Fm}	- Сопротивление трения
R_p	- Сопротивление давления
R_w	- Волновое сопротивление
R_{ws}	- Волновое сопротивление натурного судна
R_{wm}	- Волновое сопротивление модели судна
R_{BP}	- Волновое сопротивление, связанное с разрушением волн
R_{VP}	- Вязкостное сопротивление давления
R_v	- Вязкостное сопротивление
R_{we}	- Волновое сопротивление (эксперимент)
R_{wt}	- Волновое сопротивление (теория)
C_T	- Коэффициент полного сопротивления
C_R	- Коэффициент остаточного сопротивления
C_F	- Коэффициент сопротивления трения
C_{Fs}	- Коэффициент сопротивления трения натурного судна
C_{Rs}	- Коэффициент остаточного сопротивления модели судна
C_{Ts}	- Коэффициент полного сопротивления натурного судна
C_{Fm}	- Коэффициент сопротивления трения модели судна
C_{Rm}	- Коэффициент остаточного сопротивления модели судна
C_{Tm}	- Коэффициент полного сопротивления модели
C_v	- Коэффициент вязкостного сопротивления
C_w	- Коэффициент волнового сопротивления
C_{ws}	- Коэффициент волнового сопротивления натурного судна
C_{wm}	- Коэффициент волнового сопротивления модели судна
C_{FO}	- Коэффициент сопротивления трения эквивалентной плоской пластины
C_{FORMM}	- Коэффициент с учетом вязкостного сопротивления формы
F_{nm}	- Число Фруда модели
F_{ns}	- Число Фруда натурного судна
S	- Площадь смоченной поверхности
U, V, c	- Скорость натурного судна
U_m, V_m	- Скорость модели судна
ρ	- Плотность воды
k	- Коэффициент формы с учетом пространственности
k, K	- Волновое число
F_n	- Число Фруда
b, B	- Полуширина судна
d, T	- Осадка
g	- Гравитационное ускорение
ℓ	- Половина длины судна
ϕ	- Потенциал скорости
Z, ζ	- Возвышение волновой поверхности

A	- Волновая амплитудная функция
y	- Местная полуширина корпуса
L	- Длина судна
B	- Ширина судна
H	- Осадка судна
X	- Абсцисса, отсчитываемая от миделя
Z	- Заглубление от плоскости ватерлинии
H_m	- Полный напор, измеренный в следе
H_o	- Полный напор в отсутствие возмущений
ρ	- Плотность воды
w	- Площадь поперечного сечения следа в месте измерения
U_m	- Измеренная горизонтальная составляющая скорости в следе
U_e	- Значение V , соответствующее U_m на границе следа
U_e^-	- Среднее значение U_e
U_o	- Скорость однородного потока
R_{wp}	- Сопротивление, измерение волнового профиля
A_m, B_m	- Дискретные значения составляющих спектра амплитуд набегающих волн
k_o, t_m	- Дискретные значения y -составляющей волнового числа
F_y	- Вертикальная сила
M_z	- Продольный момент
h	- Глубина воды
Fn_h	- Число Фруда по глубине, $Fn_h = U/(gh)^{1/2}$
$S'(x)$	- Первая производная погруженной площади поперечного сечения по координате x
$b(x)$	- Ширина, соответствующая абсциссе x
A_w	- Площадь ватерлинии
GZ	- Продольное расстояние между центром величины (LCG) и центром тяжести LCG
Δ	- Водоизмещение судна
GM_L	- Продольная метацентрическая высота
t_t	- Полное значение дифферента
V_p	- Фазовая скорость
$2p$	- Поперечное расстояние между диаметрными плоскостями корпусов двухкорпусных судов (катамаранов) и трехкорпусных судов (тримаранов)
LS	- Продольное расстояние между сечениями мидель-шпангоутов трехкорпусных судов (тримаранов)
fR_w	- Подынтегральная функция в интеграле волнового сопротивления
$A(\theta)$	- Функция волновой амплитуды
I	- Интеграл Мичеля I
J	- Интеграл Мичеля J
I_{cp}	- Интеграл Мичеля I в диаметральной плоскости
ξ	- Безразмерная координата x
η	- Безразмерная координата y
ζ	- Безразмерная координата z
θ	- Угол распространения волн
θ_{pmax}	- Точный максимум угла распространения волн, конечный корень
MC	- Множитель Симпсона
T_c	- Осадка центрального корпуса
T_s	- Осадка боковых корпусов
B_s	- Ширина бокового корпуса

B_c	- Ширина центрального корпуса
WL	- Ватерлиния
KL	- Киль
x_o, x_{max}	- Характерные параметра вариации корпуса
A_m, z_o	- Проектные переменные в процессе оптимизации
A_w	- Площадь ватерлинии
x, y, z	- Продольные, поперечные и вертикальные координаты соответственно
$f(x, z)$	- Функция формы корпуса
$\hat{h}$	- Безразмерная глубина воды
C_{TCAT}	- Полное сопротивление катамарана
σ	- Прирост скорости воды между корпусами
τ	- $C_{W\ CAT} / C_{W\ DEMI} = [C_T - (1 + \gamma k)C_F]_{CAT} / [C_T - (1 + \gamma k)C_F]_{DEMI}$
ϕ	- Изменен поля давления вблизи полукорпусов
$1 + k$	- Фактор формы
A_m, B_m	- Дискретные значения компонентов спектра волновой амплитуды
$k_o = g/c^2$	- Фундаментальное волновое число
$k_o \ell_m$	- Дискретные значения составляющей x волнового числа
$k_o t_m$	- Дискретные значения y волнового числа
b	- Ширина бассейна
c	- Скорость поступательного движения
ε	- Произвольный фазовый угол
$HIF_T(\theta)$	- Фактор поперечного взаимодействия корпусов
$HIF_L(\theta)$	- Фактор продольного взаимодействия корпусов

Замечание: Другие обозначения вводятся в тексте различных частей работы непосредственно

БЛАГОДАРНОСТИ

Я выразить искреннюю благодарность и признательность основному научному руководителю диссертации, з.д. науки РФ, профессору СПбГМТУ К.В. Рождественскому и малазийскому со-руководителю профессору Малазийского технологического университета (МТУ). Оба профессора оказали мне большую помощь, и затратили большое время на рассмотрение работы и проведение консультаций в течение всего времени работы над диссертацией. Их большая помощь помогла мне достичь поставленных целей и благополучно завершить работу над диссертацией. Большое спасибо начальнику международного отдела СПбГМТУ Т.И. Малышевой и ее коллегам по отделу, а также сотрудникам деканата иностранных учащихся, которые с большим терпением доброжелательством успешно решали все административные вопросы.

Особая благодарность Отделению спонсорства образовательных программ Агентства MARA (Majlis Amanah Rakyat) Министерства сельско-хозяйственного и регионального развития Малайзии и Университету Куала-Лумпура (UniKL), которые осуществляли финансовую и полную моральную поддержку предпринятой работы над диссертацией. Завершение работы над данной диссертацией также знаменует выполнение одного из многих планов сотрудничества в соответствии с Протоколом о намерениях, подписанном между UniKL и СПбГМТУ в 2005 году. Повидимому, в первый раз такая аспирантская программа СПбГМТУ выполнялась в в комбинированном режиме, когда часть научных исследований была проведена в UniKL (Малайзия), а конечная часть в СПбГМТУ (Россия).

Хотел бы специально поблагодарить Центр морских технологий Малазийского технологического университета, давший согласие на проведение в его опытовом бассейне модельных экспериментов, и особенно руководителя этого Центра д-ра Ир. Мод Паузи бин Абдула Гани и его техническую команду, обеспечивших полную и компетентную поддержку выполнению указанных экспериментов, без чего верификация и апробация основных теоретических выводов данного исследования были бы невозможны.

Последняя по порядку, но не менее важная благодарность моей любимой жене Кариме бинти Хамат, моим сыновьям и дочерям, которые все до единого заслуживают мою глубокую признательность за искреннюю моральную поддержку и мотивацию, в результате чего я смог успешно завершить настоящую диссертационную работу.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Список таблиц и рисунков

Таблицы

Таблица В.1. – Коэффициент сопротивления трения C_F

Таблица 1.1 – К расчету интеграла J

Таблица 1.2 – К расчету интеграла $J(a)$

Таблица 1.3 – К расчету интеграла I

Таблица 1.4 – К расчету интеграла $I(a)$

Таблица 1.5 – Расчет теоретических значений значений волнового сопротивления судна R_w , (усовершенствованная формула Мичеля-Виглея для однокорпусного судна)

Таблица 1.6 – Схема расчета теоретических значений волнового сопротивления R_w , (усовершенствованная формула Ньюмена для расчета волнового сопротивления однокорпусного судна)

Таблица 1.7 – Коэффициенты волнового сопротивления C_w , определенные теоретическим и экспериментальным путем (Исследования 1 и 2)

Таблица 1.8 – Коэффициент волнового сопротивления C_w , найденный теоретическим и экспериментальным путем (Исследование 3 и 4)

Таблица 1.9 – Экспериментальные и теоретические значения коэффициента волнового сопротивления C_w , (Исследования 5 и 6)

Таблица 1.10 – Сангсон Дзю (Эксперимент) и МКК (Теория)
Коэффициент волнового сопротивления C_w , (Исследование 7a)

Таблица 1.11 – С.В. Сонг и Р.Е. Бадур CFD (Доусон и Ньюмен-Кельвин),
(Исследование 7b)

Таблица 1.12 – Ф. Лайли, Е. Кампана и У. Булгарелли CFD (Доусон А.Н., Доусон Ф.Д. и Ньюмен-Кельвин), (Исследование 7с)

Таблица 1.13 – Сангсон Дзю, метод волнового профиля (Экспериментальные значения C_w), (Исследование 7d)

Таблица 1.14 – Определение корней θ_{pmax} (Исследования 1 и 2)

Таблица 1.15 – Определение корней θ_{pmax} (Исследования 3 и 4)

Таблица 1.16 – Определение корней θ_{pmax} (Исследование 7a)

Таблица 1.17 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.8944607113558$ и соответствующая функция $R_w [N]$, $U = 3.25$ м/с, $F_n = 0.397$ Исследование 1 (Однокорпусное судно с корпусом LCS)

Таблица 1.18 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9321503355514$ функция формы $R_w [N]$, Исследование 2 ($U = 3.849$ м/с, $F_n = 0.470$)

Таблица 1.19 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.8699254785261$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 3 (Однокорпусное судно с корпусом Виглея 1)

Таблица 1.20 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9879362020617$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4 (Однокорпусное судно с корпусом Виглея)

Таблица 1.21 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9108921481451$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4 (Однокорпусное судно с корпусом Виглея 1)

Таблица 1.22 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9979797181928$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 7a (Однокорпусное судно с корпусом Виглея 2)

Таблица 1.23 – Характерный предварительный расчет интеграла J (Шпангоут 88, $\theta = 88$, $U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$) Исследование 1

Таблица 1.24 – Характерный расчет интеграла J ($\theta = 88$, $U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$), Исследование 1

Таблица 1.25 – Характерный предварительный расчет интеграла I (Шпангоут 88, $\theta = 88$, $U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$, $F_n = 0.362$), Исследование 2

Таблица 1.26 – Характерный расчет интеграла I ($\theta = 88$, $U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$) Исследование 2

Таблица 1.27 – Характерный расчет волнового сопротивления R_w , Исследование 1 ($U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$)

Таблица 1.28 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления R_w , Исследование 2 ($U = 3.849$ м/с, $F_n = 0.470$)

Таблица 1.29 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w , Исследование 3 ($U = 1.261$ м/с, $F_n = 0.3$)

Таблица 1.30 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w , Исследование 4 ($U = 1.681$ м/с, $F_n = 0.4$)

Таблица 1.31 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w , Исследование 7a ($U = 2.023$ м/с, $F_n = 0.37$)

Таблица 2.1 – Схема расчета теоретических значений волнового сопротивления R_w , (двухкорпусных судно)

Таблица 2.2 – Результаты экспериментального анализа ($2p/L = 0.3$, Корпус Виглея 1)

Таблица 2.3 – Результаты экспериментального анализа ($2p/L = 0.4$, Корпус Виглея 1)

Таблица 2.4 – Результаты экспериментального анализа ($2p/L = 0.5$, Корпус Виглея 1)

Таблица 2.5 – Экспериментальный коэффициент волнового сопротивления судна C_w , Исследование 1, Корпус Виглея

Таблица 2.6 – Экспериментальный коэффициент волнового сопротивления судна C_w , Исследование 1, Корпус Виглея 1

Таблица 2.7 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления судна C_w , Исследование 1, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Ньюмена

Таблица 2.8 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления судна R_w , Исследование 1, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. Формула Ньюмена

Таблица 2.9 – Различие в процентах между теоретическими и экспериментальными значениями C_w , Исследование 1, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. Формула Ньюмена

Таблица 2.10 – Характерный конечный корень $\theta_{rmax} = 89.9900454988165$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 1, Катамаран, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. Формула Ньюмена, $F_n = 0.3$, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.11 – Характерный конечный корень $\theta_{rmax} = 89.9791889522389$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 1, Катамаран, Корпус Виглея 1, Конечный корень, усоверш. Формула Ньюмена, $F_n = 0.7$, $2p/L = 0.4$

Таблица 2.12 – Характерный конечный корень $\theta_{rmax} = 89.9918918304819$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 1, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.13 – Теоретическое значение коэффициента волнового сопротивления C_w , Исследование 2, Исследование 1, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея

Таблица 2.14 – Теоретическое значение волнового сопротивления $R_w [N]$, Исследование 2, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея

Таблица 2.15 – Различие в процентах теоретических и экспериментальных значений C_w , Исследование 2, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея

Таблица 2.16 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{pmax}} = 89.9893458045552$ и функция формы $R_w[N]$, Исследование 2, Катамаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.17 – Характерный корень $\theta_{\text{pmax}} = 89.9949048300982$ и функция формы $R_w[N]$, Исследование 2, Катамаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.9$, $2p/L = 0.4$

Таблица 2.18 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{pmax}} = 89.9970957523684$ и функция формы $R_w[N]$, Исследование 2, Катамаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.19 – Теоретическое значение коэффициента C_w , Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.20 – Различие в процентах теоретических и экспериментальных значений $R_w[N]$, Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.21 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{pmax}} = 88.0508550563317$ и функция формы $R_w[N]$, Исследование 3, Катамаран МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.3$, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.22 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{pmax}} = 89.2984728488293$ и функция формы $R_w[N]$, Исследование 3, Катамаран, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.5$, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.23 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{pmax}} = 89.9409812811429$ и функция формы $R_w[N]$, Исследование 3, Катамаран с корпусом NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.24 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления C_w , Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.25 – Различие в процентах теоретических и экспериментальных значений $R_w[N]$, Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.26 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{pmax}} = 89.7210739360760$ и функция формы $R_w[N]$, Исследование 3, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.46$, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.27 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{pmax}} = 89.83606167824640$ и функция формы $R_w[N]$, Исследование 3, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.6$, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.28 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{pmax}} = 89.7259648418313$ и функция формы $R_w[N]$, Исследование 3, Катамаран NPL, Усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.29 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{pmax}} = 89.9409812811429$ и функция формы $R_w[N]$, Исследование 3, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.30 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления C_w , Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, в сравнении с данными Инсела-Молланда-Велликома, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.31 – Различие в процентах теоретических и экспериментальных значений $R_w [N]$, Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея в сравнении с данными Инсела-Молланда-Велликома, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.32 – Конечный корень $\theta_{pmax} = 89.5181880989191$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.35$, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.33 – Характерный конечный корень $\theta_{pmax} = 89.721073936076$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.46$, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.34 – Характерный конечный корень $\theta_{pmax} = 89.64209492385750$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.7$, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.35 – Характерный конечный корень $\theta_{pmax} = 89.783481739949$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.9$, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.36 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления C_w , Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея в сравнении с данными Инсела-Молланда-Велликома, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.37 – Различие в процентах между теоретическими и экспериментальными значениями $R_w [N]$, Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея в сравнении Инсела-Молланда-Велликома, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.38 – Характерный конечный корень $\theta_{pmax} = 89.63112121329010$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.4$, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.39 – Характерный конечный корень $\theta_{pmax} = 89.7737868038444$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.6$, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.40 – Характерный конечный корень $\theta_{pmax} = 89.7259648418313$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.41 – Характерный конечный корень $\theta_{pmax} = 89.78348173994900$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.9$, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.42 – Характерный конечный корень $\theta_{pmax} = 89.8246223203621$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усовершенш.

формула Мичеля-Виглея, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

Таблица 2.43 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 1, Катамаран, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.3$, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.44 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 1, Катамаран, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. Ньюмена, $F_n = 0.7$, $2p/L = 0.4$

Таблица 2.45 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 2, Катамаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.46 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 2, Катамаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

Table 2.47 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 3, Катамаран NPL, МКК, усоверш формула Ньюмена, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.3$

Таблица 2.48 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.9$, $2p/L$

Таблица 2.49 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

Таблица 3.1 – Схема расчета теоретического волнового сопротивления R_w , ($LS = 0$ м; мидель боковых и центрального корпусов на одной линии) (Тримаран)

Таблица 3.2 – Схема расчета теоретического волнового сопротивления R_w , ($LS = 0.35$ м в корму; мидель боковых корпусов на 0.35 м от миделя центрального корпуса) (Тримаран)

Таблица 3.3 – Результаты экспериментального анализа (Исследование 1, $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м)

Таблица 3.4 – Результаты экспериментального анализа (Исследование 2, $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ м)

Таблица 3.5 – Результаты экспериментального анализа (Исследование 3, $2p/L = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму)

Таблица 3.6 – Результаты экспериментального анализа (Исследование 4, $2p/L = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму)

Таблица 3.7 – Экспериментальное значение коэффициента волнового сопротивления судна C_w

Таблица 3.8 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления C_w

Таблица 3.9 – Экспериментальный коэффициент волнового сопротивления R_w [N]

Таблица 3.10 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления R_w [N]

Таблица 3.11 – Различие (%) между теоретическими и экспериментальными значениями R_w и C_w

Таблица 3.12 – Теоретический коэффициент волнового сопротивления судна C_w , (Исследование 5)

Таблица 3.13 – Теоретическое значение волнового сопротивления R_w [N], (Исследование 5)

Таблица 3.14 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления R_w , Исследование 1, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{nCH} = 0.424$, $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м

Таблица 3.15 – Характерный конечный корень $\theta_{rmax} = 89.94503510547600$ и функция формы R_w [N], Исследование 1, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{nCH} = 0.424$, $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м

Таблица 3.16 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления R_w [N], Исследование 2, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{nCH} = 0.509$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ м

Таблица 3.17 – Характерный конечный корень $\theta_{rmax} = 89.9774773063894$ и функция формы R_w [N], Исследование 2, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{nCH} = 0.509$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ м

Таблица 3.18 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления R_w [N], Исследование 3, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. метод Ньюмена, $F_{nCH} = 0.509$, $2p/L = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму

Таблица 3.19 – Характерный конечный корень $\theta_{rmax} = 89.9774773063894$ и функция формы R_w [N], Исследование 3, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, формула Ньюмена, $F_{nCH} = 0.509$, $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м в корму

Таблица 3.20 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления R_w [N], Исследование 4, Тримаран, Корпуса Виглея 1 and 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{nCH} = 0.594$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму

Таблица 3.21 – Характерный конечный корень $\theta_{rmax} = 89.9862636044935$ и функция формы R_w [N], Исследование 4, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{nCH} = 0.594$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ м в корму

Таблица 3.22 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления R_w [N], Исследование 5, Тримаран, Корпуса Виглея 5 и 6, МКК, $F_{nCH} = 0.33$, $2p/L = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму

Таблица 3.23 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления $R_w [N]$, Исследование 5, Тримаран, Корпуса Виглея 5 и 6, МКК, $F_{nCH} = 0.42$, $2p/L = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму

Таблица 3.24 – Характерный конечный корень $\theta_{pmax} = 89.94325799788390$, и функция формы $R_w [N]$, Исследование 1, Тримаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $2p/L_{CH} = 0.216$, $LS = 0$ м, $F_{nCH} = 0.424$

Таблица 3.25 – Характерный конечный корень $\theta_{pmax} = 89.9774773063894$, и функция формы $R_w [N]$, Исследование 2, Тримаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $2p/L_{CH} = 0.288$, $LS = 0$ м, $F_{nCH} = 0.509$

Таблица 3.26 – Характерный конечный корень $\theta_{pmax} = 89.9774773063894$, и функция формы $R_w [N]$, Исследование 3, Тримаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $2p/L_{CH} = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму, $F_{nCH} = 0.509$

Таблица 3.27 – Характерный конечный корень $\theta_{pmax} = 89.9862636044935$, и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Тримаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $2p/L_{CH} = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму, $F_{nCH} = 0.594$

Таблица 3.28 – Характерный конечный корень $\theta_{pmax} = 89.9507258931352$, и функция формы $R_w [N]$, Исследование 5, Тримаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $2p/L_{CH} = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму, $F_{nCH} = 0.33$

Таблица 3.29 – Характерный конечный корень $\theta_{pmax} = 89.9610471677195$, и функция формы $R_w [N]$, Исследование 6, Тримаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $2p/L_{CH} = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму, $F_{nCH} = 0.42$

Таблица 4.1 – Варианты параметрических исследований

Таблица 4.2 – Теоретическое значение C_w при вариации b или d (однокорпусное судно)

Таблица 4.3 – Теоретическое значение C_w при вариации b и d (однокорпусное судно)

Таблица 4.4 – Теоретические значения C_w при вариации $2p/L$ (Катамаран, корпус Виглея 1)

Таблица 4.5 – Теоретические значения C_w при вариации b или d (Катамаран, $2p/L = 0.3$)

Таблица 4.6 – Теоретические значения C_w при вариации b или d (Катамаран, $2p/L = 0.4$)

Таблица 4.7 – Теоретические значения C_w при вариации b или d (Катамаран, $2p/L = 0.5$)

Таблица 4.8 – Теоретические значения C_w при вариации b и d (Катамаран, $2p/L = 0.3$)

Таблица 4.9 – Теоретические значения C_w при вариации b и d (Катамаран, $2p/L = 0.4$)

Таблица 4.10 – Теоретическое значение C_w при вариации b и d (Катамаран, $2p/L=0.5$)

Таблица 4.11 – Теоретические значения C_w тримарана при вариации $2p/L$

Таблица 4.12 – Теоретические значения C_w при вариации b и d (Тримаран, $2p/L=0.216$, $LS = 0$ м)

Таблица 4.13 – Теоретические значения C_w при вариации b и d (Тримаран, $2p/L=0.288$, $LS = 0$ м)

Таблица 4.14 – Теоретическое значение C_w при вариации b и d (Тримаран, $2p/L=0.216$, $LS = 0.35$ м в корму)

Таблица 4.15 – Теоретические значения C_w при вариации b и d (Тримаран, $2p/L=0.288$, $LS = 0.35$ м в корму)

Рисунки

Рис. В.1. – Составляющие сопротивления судна

Рис. В.2. – Составляющие сопротивления судна в методе форм-фактора

Рис. В.3. – Структура волны Кельвина

Рис. В.4. – Скорости поперечных и расходящихся волн

Рис. В.5. – Сравнение результатов, полученных из Интеграла Мичеля, Тейлора – Гертлера и эксперимента

Рис. В.6. – Система координат x - y - z

Рис. В.7. – Геометрия судна с дифферентом

Рис. В.8. – Концепция источника и стока при рассмотрении движения судна

Рис. В.9. (а) – В.9. (b) – Кривые остаточного сопротивления, дифферента и заглубления

Рис. В.10. – Кривые остаточного сопротивления

Рис. В.11. – Волновая система Виглея для формы корпуса с клинообразными оконечностями

Рис. В.12. – Составляющие волнового сопротивления судна с клиновидной формой корпуса

Рис. В.13. – Волновые системы модели судна с параболической ватерлинии

Рис. В.14. – Волновое сопротивление от поперечных и расходящихся волн

Рис. В.15. – Графф и др. (1964), R_R/Δ для модели при $C_p = 0.64$ и $B/T = 3$

Рис. В.16. (a) – В.16. (b) – R_h/R_∞ в функции от F_L и F_h при вариации h/L

Рис. В.17. (a) – В.17. (d) – Теоретические и экспериментальные результаты для модели VBD 220

Рис. В.18. (a) – В.18. (c) – Теоретические и экспериментальные результаты для модели VBD 331

Рис. В.19. – Методы расчета для трех зон

Рис. В.20. (a) – В.20. (d) – Расчеты по ShipFlow, Hydros и эксперимент

Рис. В.21. (a) – В.21. (b) – Волновое сопротивление в функции от скорости

Рис. В.22. (a) – В.22. (b) – Полное сопротивление в функции от скорости

Рис. В.23. – Результаты теоретических расчетов по методам LFT, MEM и MES

Рис. В.24. – Экспериментальные результаты Инсела-Молланда-Велликома (1994)

Рис. В.25. – Теоретические результаты Инсела-Молланда-Велликома (1994)

Рис. В.26. – Диаграмма процесса исследований

Рис. 1.1 – Координатная система для однокорпусного судна

Рис. 1.2 – Блок-схема расчета (Теоретический расчет для однокорпусного судна)

Рис. 1.3 – График C_{Tm}/C_{Fom} в функции от F_{nm}^4/C_{Fom} для форм-фактора $(1+k)$ (Случаи исследований 1 и 2)

Рис. 1.4 – График C_{Tm}/C_{Fom} в функции F_{nm}^4/C_{Fom} для фактора $(1+k)$ (Исследование 3)

Рис. 1.5 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w в функции от F_n (Исследование 1)

Рис. 1.6 – Графики экспериментальных и теоретических значений R_w в функции от F_n (Исследование 1)

Рис. 1.7 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w в функции F_n (Исследование 2)

Рис. 1.8 – Графики экспериментальных и теоретических значений R_w в функции F_n (Исследование 2)

Рис. 1.9 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w в функции от F_n Исследования 3, 4, 5 и 6

Рис. 1.10 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w в функции от числа F_n (Исследование 7)

Рис. 1.11 – Функция формы интеграла волнового сопротивления R_w [N], $U = 3.25$ м/с, $F_n = 0.397$, Исследование 1 (Однокорпусное судно к корпусом LCS)

Рис. 1.12 – Функция формы интеграла волнового сопротивления R_w [N], $U = 3.849$ м/с, $F_n = 0.470$, Исследование 2 (Однокорпусное судно к корпусом LCS)

Рис. 1.13 – Функция формы интеграла волнового сопротивления R_w [N], $U = 1.261$ м/с, $F_n = 0.3$, Исследование 3 (Однокорпусное судно с корпусом Виглея)

Рис. 1.14 – Функция формы волнового сопротивления R_w [N], $U = 4.202$ м/с, $F_n = 1.0$, Исследование 4 (Однокорпусное судно с корпусом Виглея 1)

Рис. 1.15 – Функция формы интеграла волнового сопротивления R_w [N], $U = 1.681$ м/с, $F_n = 0.4$, Исследование 4 (Однокорпусное судно с корпусом Виглея 1)

Рис. 1.16 – Функция формы интеграла волнового сопротивления R_w [N], $U = 2.023$ м/с, $F_n = 0.37$, Исследование 7а (Однокорпусное судно с корпусом Виглея 2)

Рис. 2.1 – Блок-схема расчета (Теоретический расчет для двухкорпусного судна)

Рис. 2.2 – Двухкорпусная конфигурация (вид в плане) и система координат

Рис. 2.3 – Конфигурация двухкорпусного судна (вид спереди) и система координат

Рис. 2.4 – График C_{Tm}/C_{Fom} в зависимости от $F_{n_m}^4/C_{Fom}$ для форм-фактора $(1+k)$ ($2p/L = 0.3$, Корпус Виглея 1)

Рис. 2.5 – График C_{Tm}/C_{Fom} в зависимости от $F_{n_m}^4/C_{Fom}$ для форм-фактора $(1+k)$ ($2p/L = 0.4$, Корпус Виглея 1)

Рис. 2.6 – График C_{Tm}/C_{Fom} от $F_{n_m}^4/C_{Fom}$ для форм-фактора $(1+k)$ ($2p/L = 0.5$, Корпус Виглея 1)

Рис. 2.7 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w , Исследование 1, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Ньюмена

Рис. 2.8 – Характерная функция формы R_w [N], Исследование 1, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. Формула Ньюмена, $F_n = 0.3$, $2p/L = 0.3$

Рис. 2.9 – Характерная функция формы $R_w[N]$, Исследование 1, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. Метод Ньюмена, $F_n = 0.7$, $2p/L = 0.4$

Рис. 2.10 – Характерная функция формы $R_w[N]$, Исследование 1, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

Рис. 2.11 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w , Исследования 2, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея

Рис. 2.12 – Характерная функция формы $R_w[N]$, Исследование 2, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.3$

Рис. 2.13 – Характерная функция формы $R_w[N]$, Исследование 2, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.9$, $2p/L = 0.4$

Рис. 2.14 – Характерная функция формы $R_w[N]$, Исследование 2, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

Рис. 2.15 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w в функции F_n , Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $2p/L = 0.3$

Рис. 2.16 – Типовая функция формы $R_w[N]$, Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.3$, $2p/L = 0.3$

Рис. 2.17 – Характерная функция формы $R_w[N]$, Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. метод Ньюмена, $F_n = 0.5$, $2p/L = 0.3$

Рис. 2.18 – Характерная функция формы $R_w[N]$, Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.3$

Рис. 2.19 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w от F_n , Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $2p/L = 0.5$

Рис. 2.20 – Характерная функция формы $R_w[N]$, Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.46$, $2p/L = 0.5$

Рис. 2.21 – Характерная функция формы $R_w[N]$, Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.6$, $2p/L = 0.5$

Рис. 2.22 – Характерная функция формы $R_w[N]$, Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. Формула Ньюмена, $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.5$

Рис. 2.23 – Характерная функция формы $R_w[N]$, Исследование 3, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

Рис. 2.24 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w от F_n , Исследование 4, корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $2p/L = 0.3$

Рис. 2.25 – Функция формы $R_w[N]$, Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.35$, $2p/L = 0.3$

Рис. 2.26 – Характерная функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.46$, $2p/L = 0.3$)

Рис. 2.27 – Характерная функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.7$, $2p/L = 0.3$

Рис. 2.28 – Характерная функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.9$, $2p/L = 0.3$

Рис. 2.29 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w от F_n Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, в сравнении с данными Инсела-Молланда-Велликома, $2p/L = 0.5$

Рис. 2.30 – Характерная функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.4$, $2p/L = 0.5$

Рис. 2.31 – Характерная функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.6$, $2p/L = 0.5$

Рис. 2.32 – Характерная функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.5$

Рис. 2.33 – Характерные функции формы $R_w [N]$, Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.9$, $2p/L = 0.5$

Рис. 2.34 – Характерная функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Корпус NPL, МКК, усовершенш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

Рис. 3.1 – Тримаран (вид в плане) и координатная система

Рис. 3.2 – Тримаран (вид спереди) и система координат

Рис. 3.3 – Блок-схема расчетных процедур (Теоретические расчеты для катамарана)

Рис. 3.4 – График C_{Tm}/C_{Fom} от F_{nm}^4/C_{Fom} для форм-фактора $(1+k)$, Исследование 1, $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м

Рис. 3.5 – График C_{Tm}/C_{Fom} от F_{nm}^4/C_{Fom} для форм-фактора $(1+k)$, Исследование 2, $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ м

Рис. 3.6 – График C_{Tm}/C_{Fom} от F_{nm}^4/C_{Fom} для форм-фактора $(1+k)$, Исследование 3, $2p/L = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму

Рис. 3.7 – График C_{Tm}/C_{Fom} от F_{nm}^4/C_{Fom} для форм-фактора $(1+k)$, Исследование 4, $2p/L = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму

Рис. 3.8 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w

Рис. 3.9 – Графики экспериментальных и теоретических значений $R_w [N]$

Рис. 3.10 – Характерная функция формы $R_w [N]$; $2p/L_{CH} = 0.216$, $LS = 0$ м
 $F_{nCH} = 0.424$, Исследование 1

Рис. 3.11 – Характерная функция формы $R_w [N]$; $2p/L_{CH} = 0.288$, $LS = 0$ м
 $F_{nCH} = 0.509$, Исследование 2

Рис. 3.12 – Характерная функция формы $R_w [N]$; $2p/L_{CH} = 0.216$, $LS = 0.35$ м в
 Корму, $F_{nCH} = 0.509$, Исследование 3

Рис. 3.13 – Характерная функция формы $R_w [N]$; $2p/L_{CH} = 0.288$, $LS = 0.35$ м в
 Корму, $F_{nCH} = 0.594$, Исследование 4

Рис. 3.14 – Графики экспериментальных и теоретических значений C_w ,
 Исследование 5

Рис. 3.15 – Характерная функция формы $R_w [N]$; $2p/L_{CH} = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму,
 $F_{nCH} = 0.33$, Исследование 5

Рис. 3.16 – Характерная функция формы $R_w [N]$; $2p/L_{CH} = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму
 $F_{nCH} = 0.42$, Исследование 6

Рис. 4.1 – Графики теоретических значений C_w в функции числа Фруда F_n при
 вариации b или d (однокорпусное судно)

Рис. 4.2 – Графики теоретических значений R_w от F_n при вариации b и d
 (однокорпусное судно)

Рис. 4.3 – Графики теоретических значений C_w при вариации $2p/L$
 (Катамаран, корпус Виглея 1)

Рис. 4.4 – Графики теоретических значений C_w при вариации b или d
 (катамаран, $2p/L = 0.3$)

Рис. 4.5 – Графики теоретических значений C_w При вариации b или d
 (Катамаран, $2p/L = 0.4$)

Рис. 4.6 – Графики теоретических значений C_w При вариации b или d
 (Катамаран, $2p/L = 0.5$)

Рис. 4.7 – Графики теоретических значений C_w При вариации b и d
 (Катамаран, $2p/L = 0.3$)

Рис. 4.8 – Графики теоретических значений C_w При вариации b и d
 (Катамаран, $2p/L = 0.4$)

Рис. 4.9 – Графики теоретических значений C_w при вариации b и d
 (катамаран, $2p/L = 0.5$)

Рис. 4.10 – Графики теоретических значений C_w при вариации $2p/L$ (тримаран)

Рис. 4.11 – Графики теоретических значений C_w при вариации b и d

(тримаран, $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м)

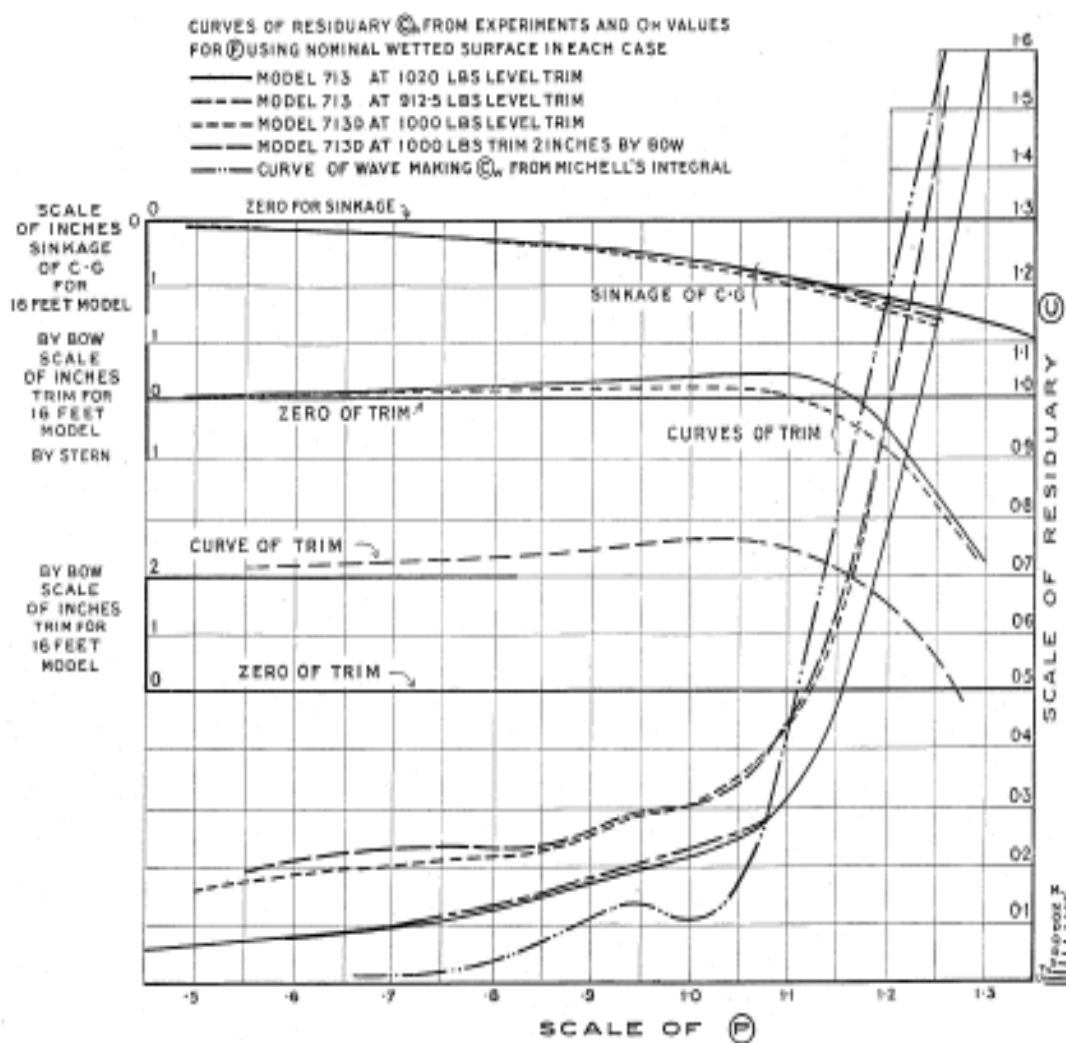
Рис. 4.12 – Графики теоретических значений C_w при вариации b и d
(тримаран, $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ м)

Рис. 4.13 – Графики теоретических значений C_w при вариации b и d
(тримаран, $2p/L = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму)

Рис. 4.14 – Графики теоретических значений C_w при вариации b и d
(тримаран, $2p/L = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму)

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Некоторые экспериментальные и теоретические результаты других авторов



(a)

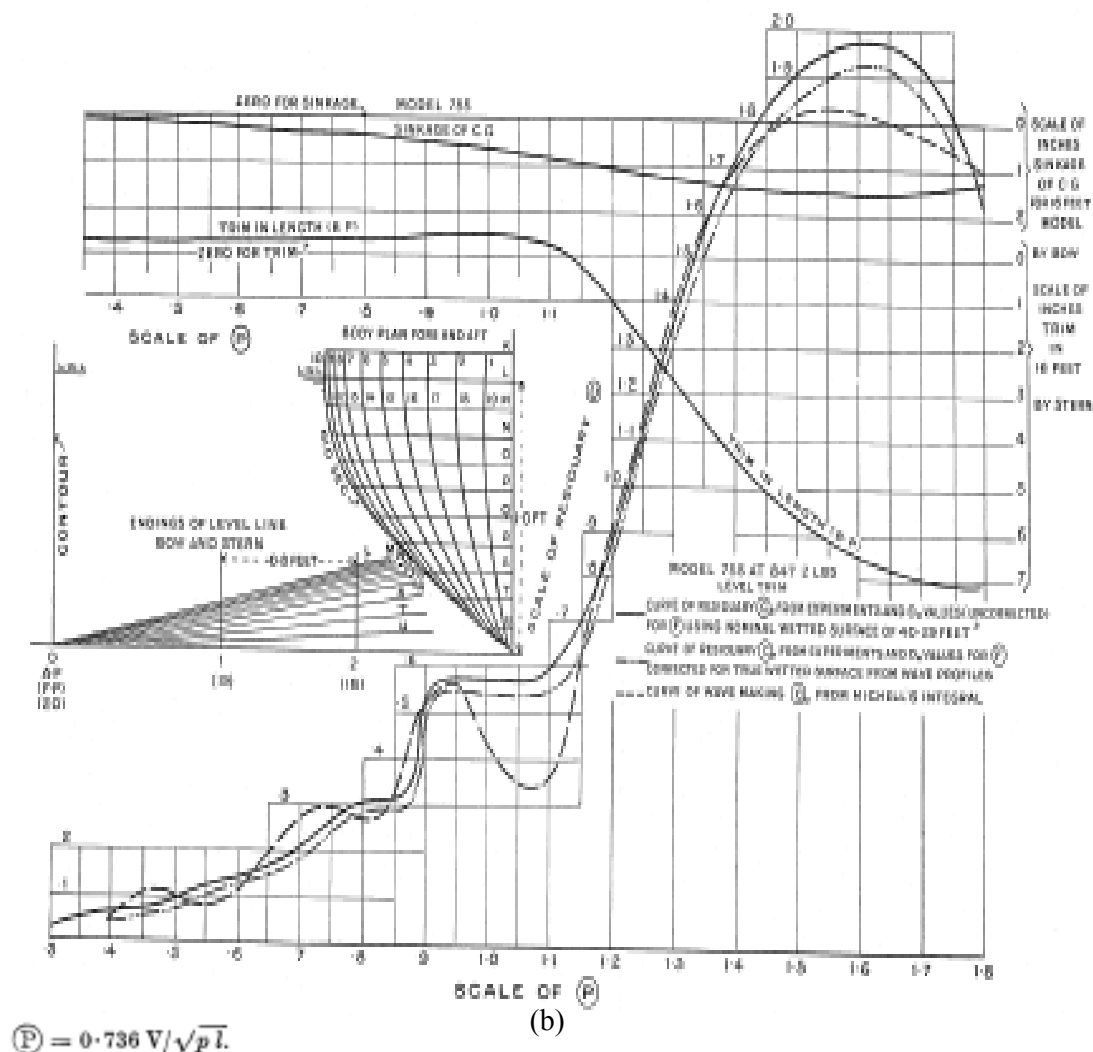


Рис. В.9. (а) – В.9. (b) – Кривые остаточного сопротивления, дифферент и заглубление (Виглей 1926)

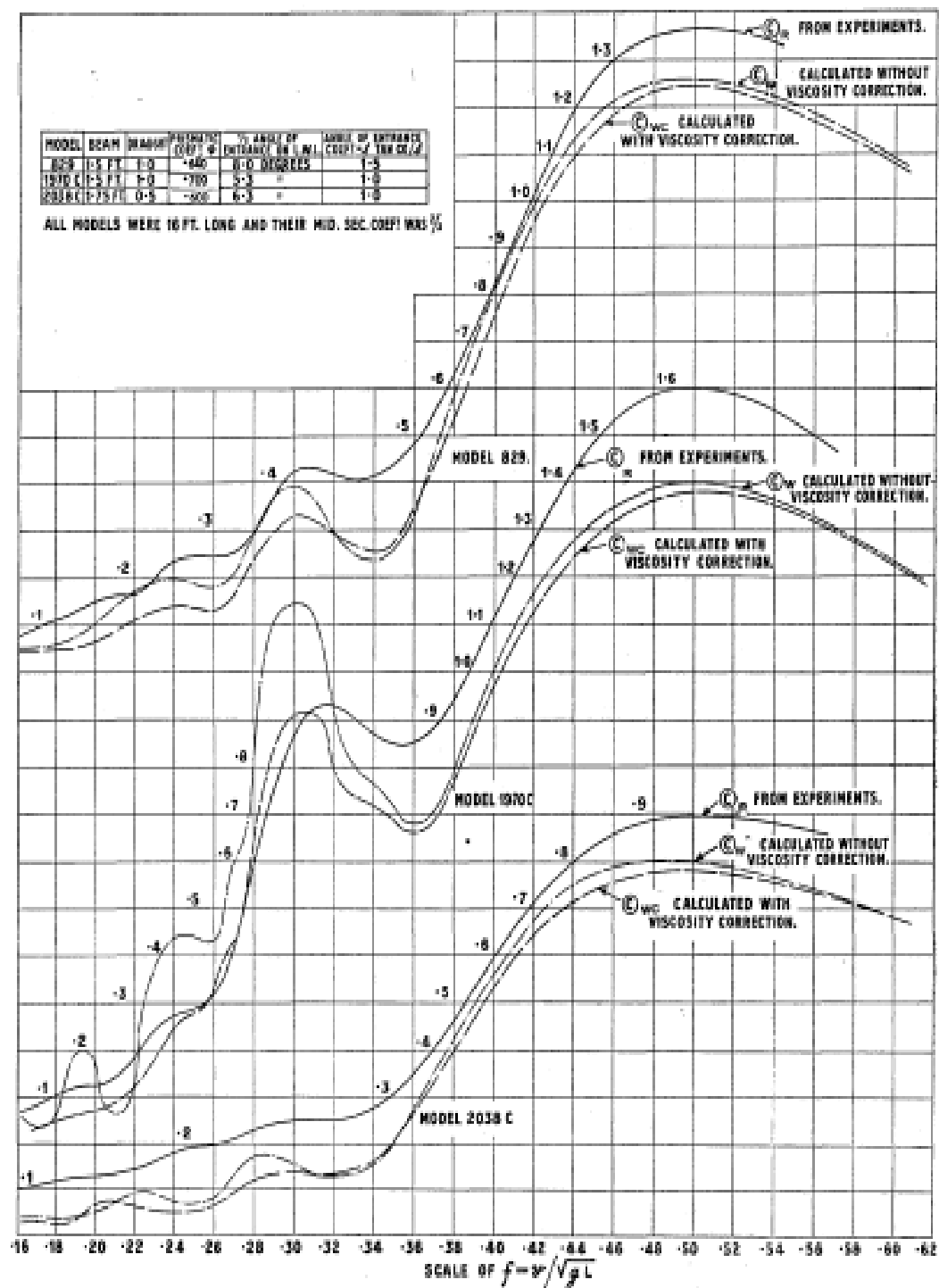


Рис. В.10. – Кривые остаточного сопротивления (Виглея 1942)

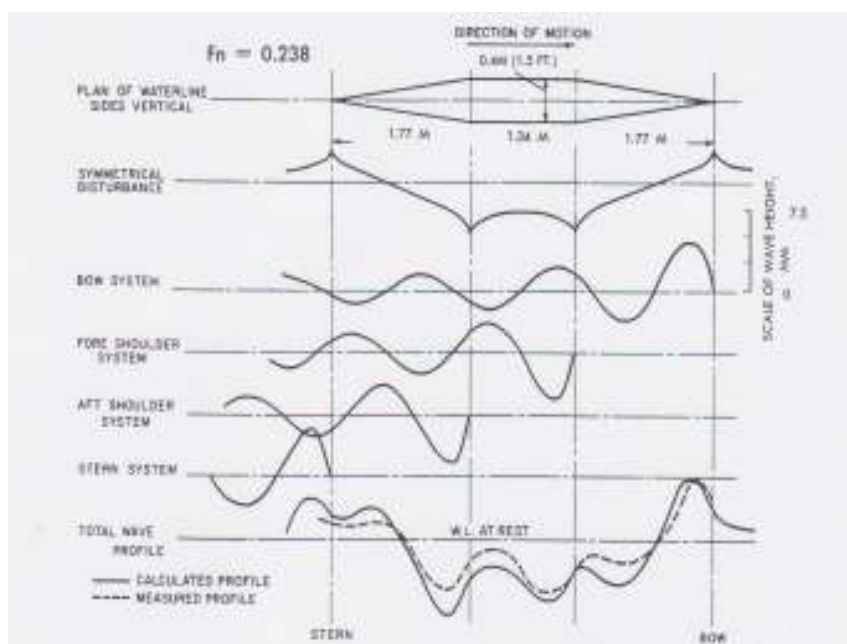


Рис. В.11 – Волновая система Виглея для клиновидного судна

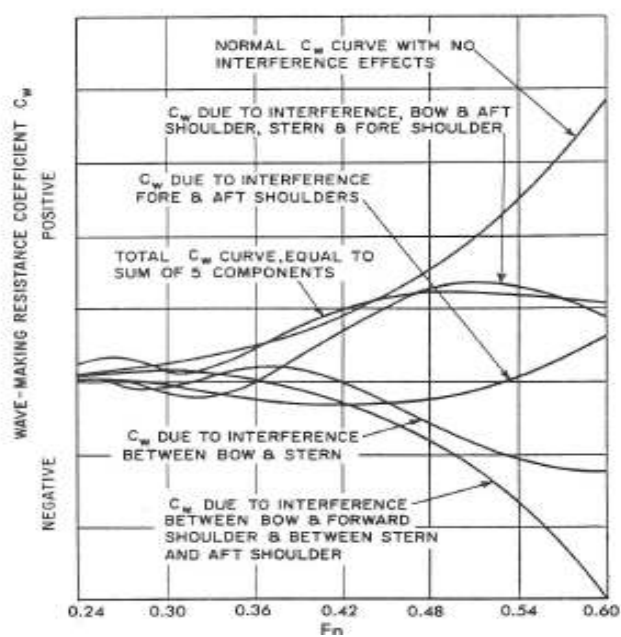


Рис. В.12. – Составляющие водного сопротивления клиновидной модели

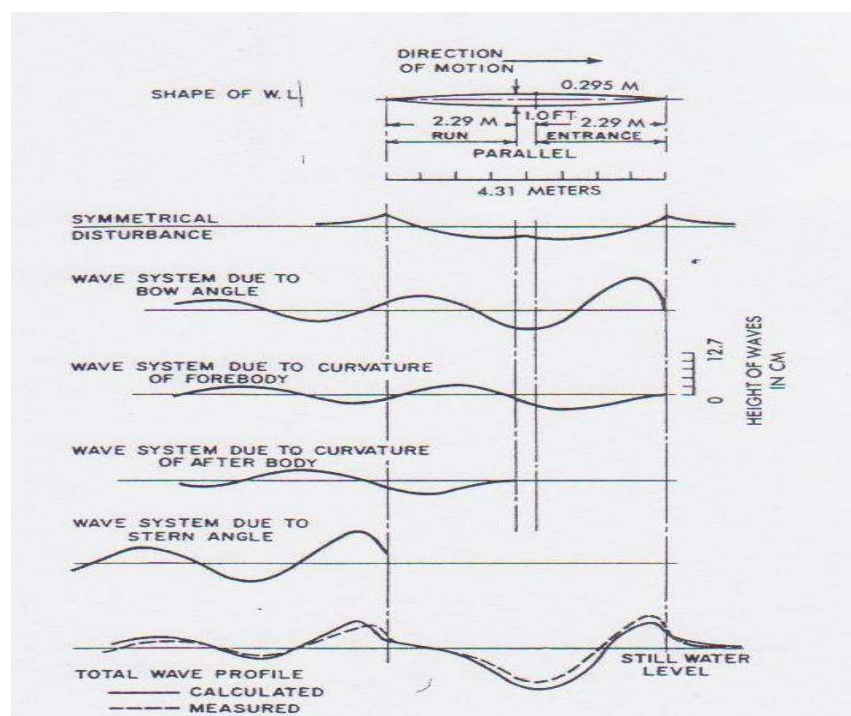


Рис. В.13. – Волновые системы модели судна с параболической ватерлинии

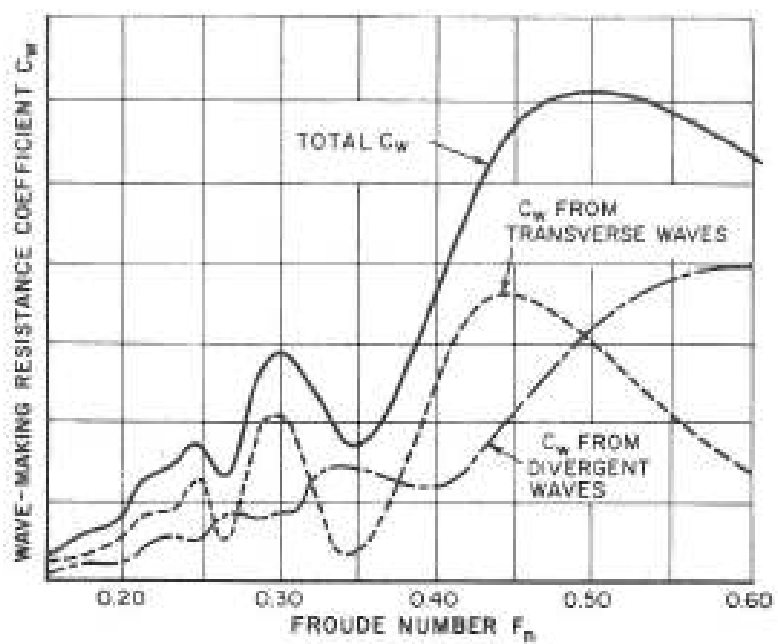


Рис. В.14. – Волновое сопротивление от поперечных и расходящихся волн

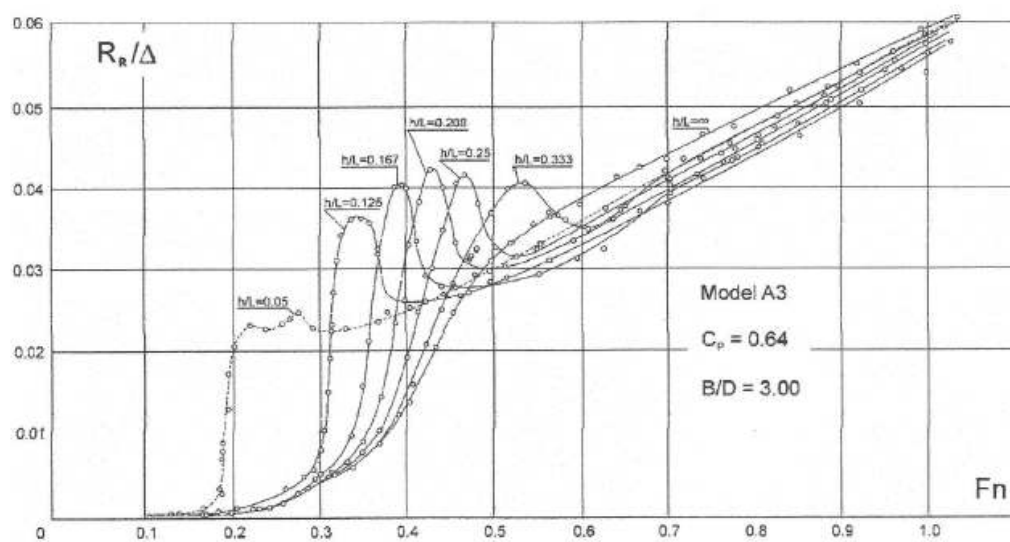
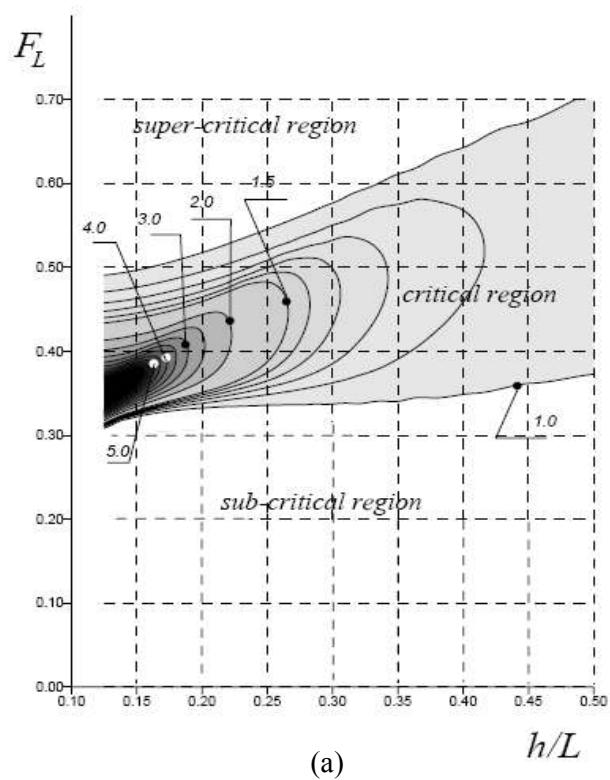


Рис. В.15. – Графф и др. (1964), R_R/Δ для модели при $C_p = 0.64$ и $B/T = 3$



(a)

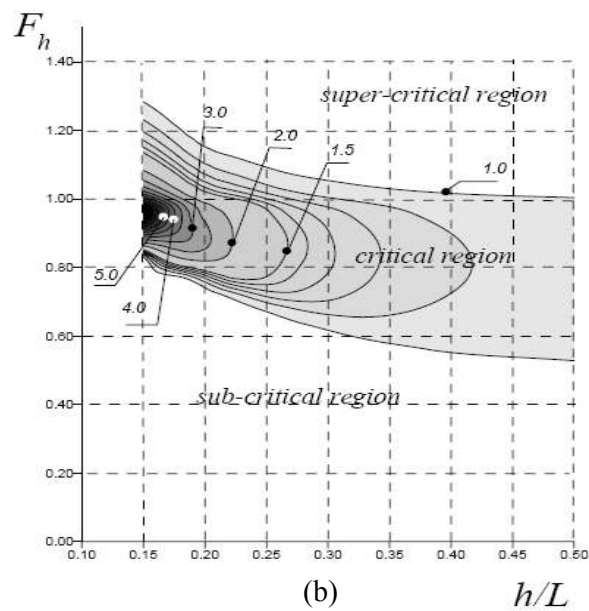
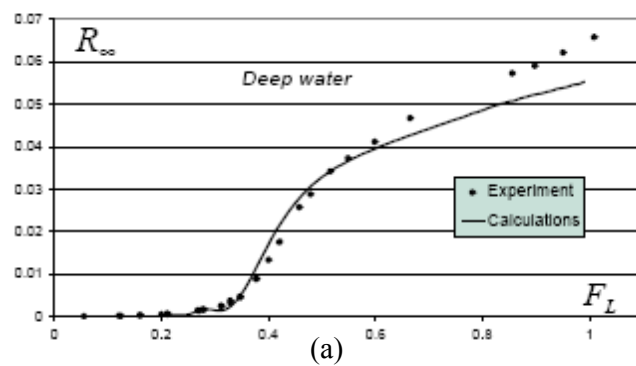
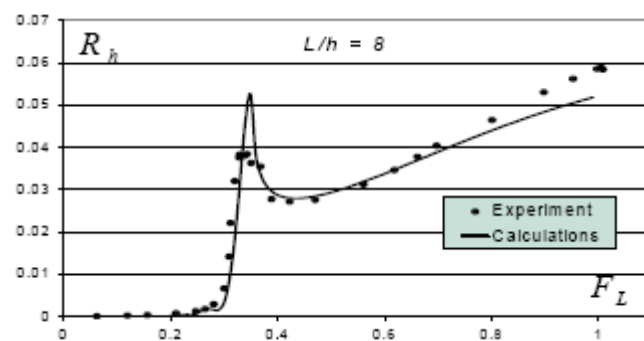


Рис. В.16. (а) – В.16. (b) – R_h/R_∞ в функции от F_L и F_h в зависимости от h/L

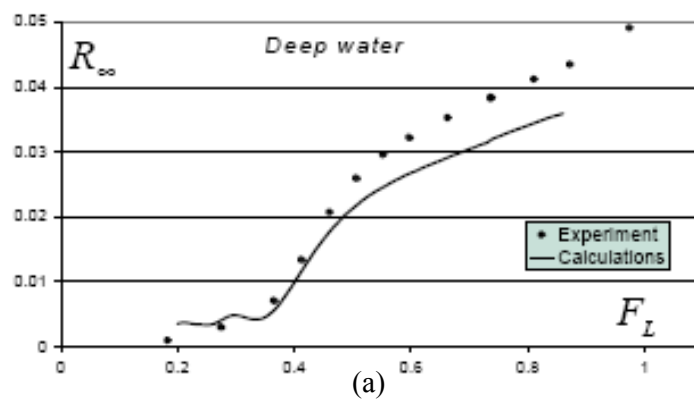


(a)

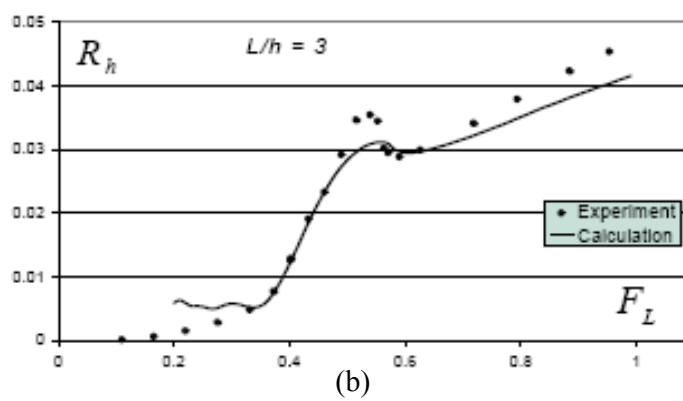


(b)

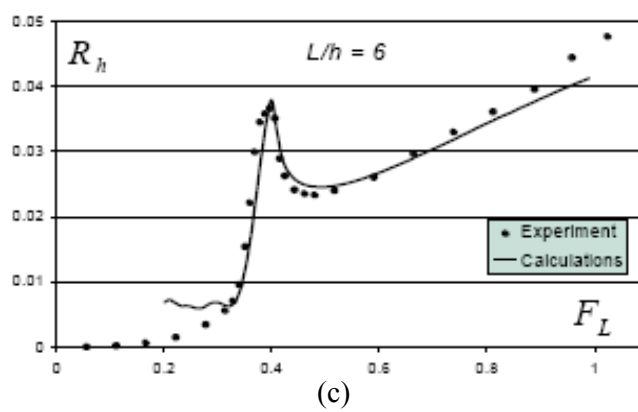
Рис. В.17. (а) – В.17. (b) – Теоретические и экспериментальные результаты для модели VBD 220



(a)



(b)



(c)

Рис. В.18. (a) – В.18. (c) – Теоретические и экспериментальные результаты для модели VBD 331

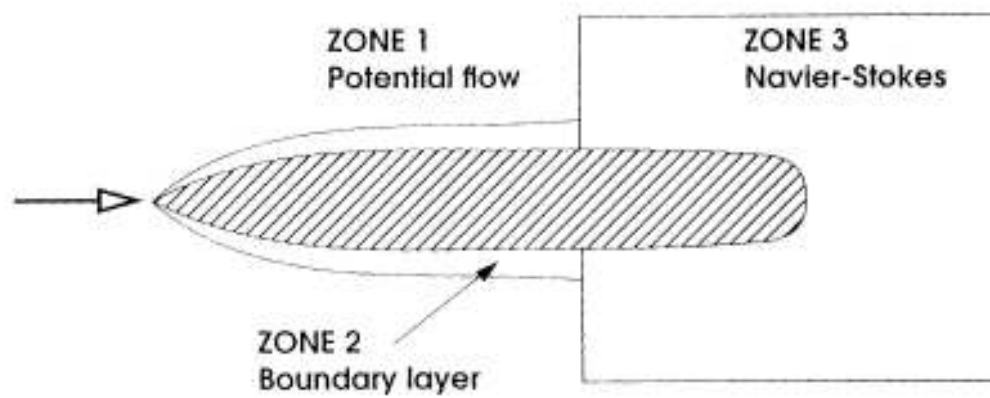
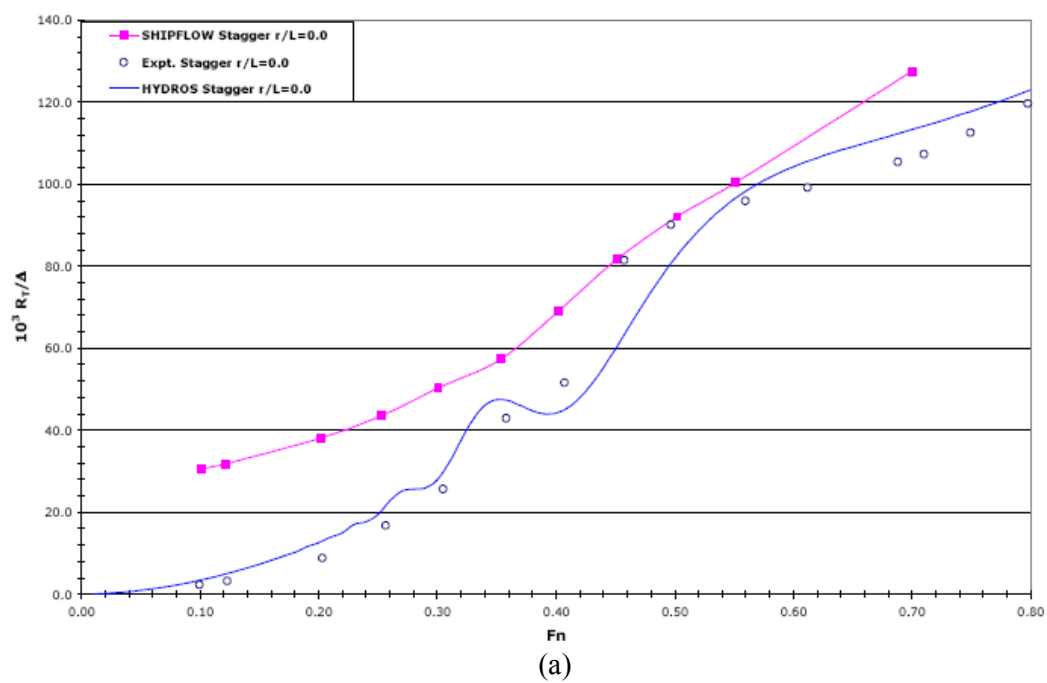


Рис. В.19. – Методы расчета для трех зон



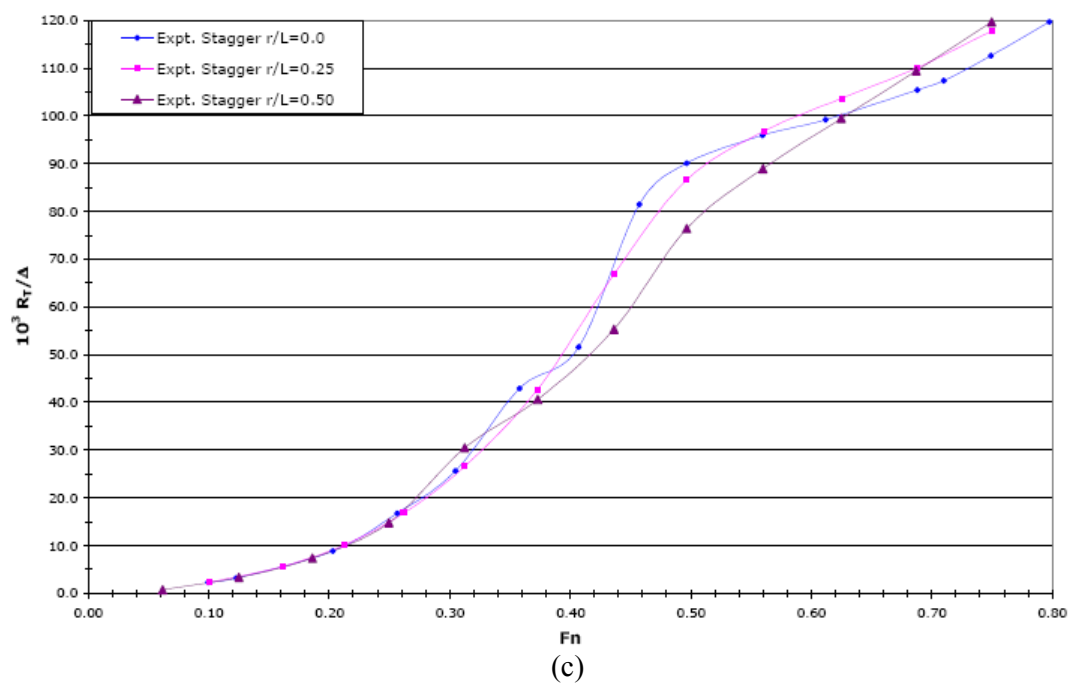
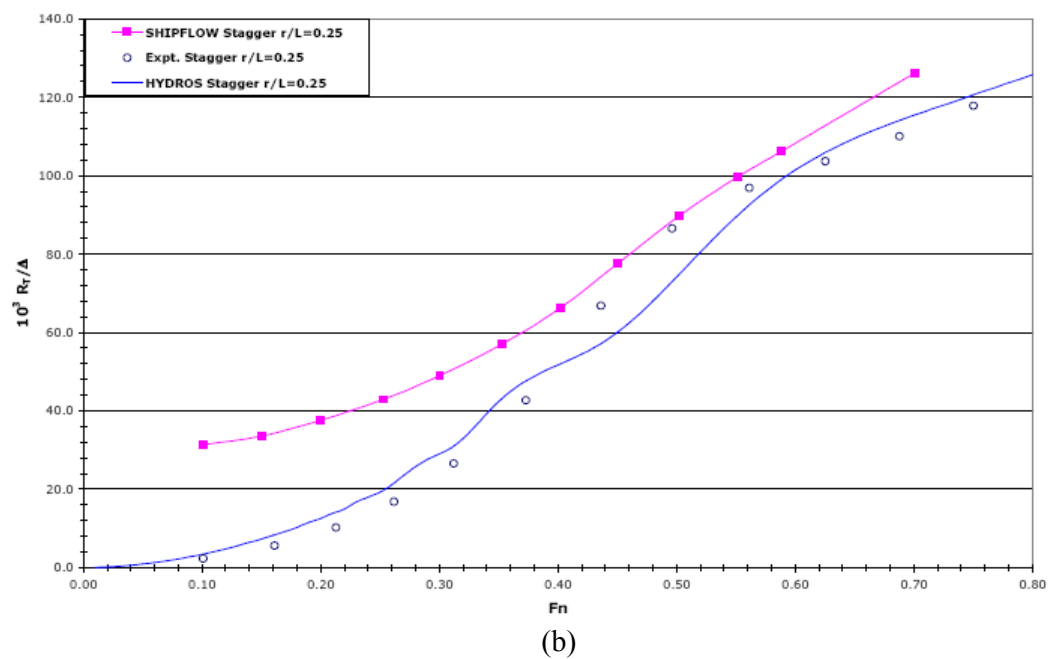
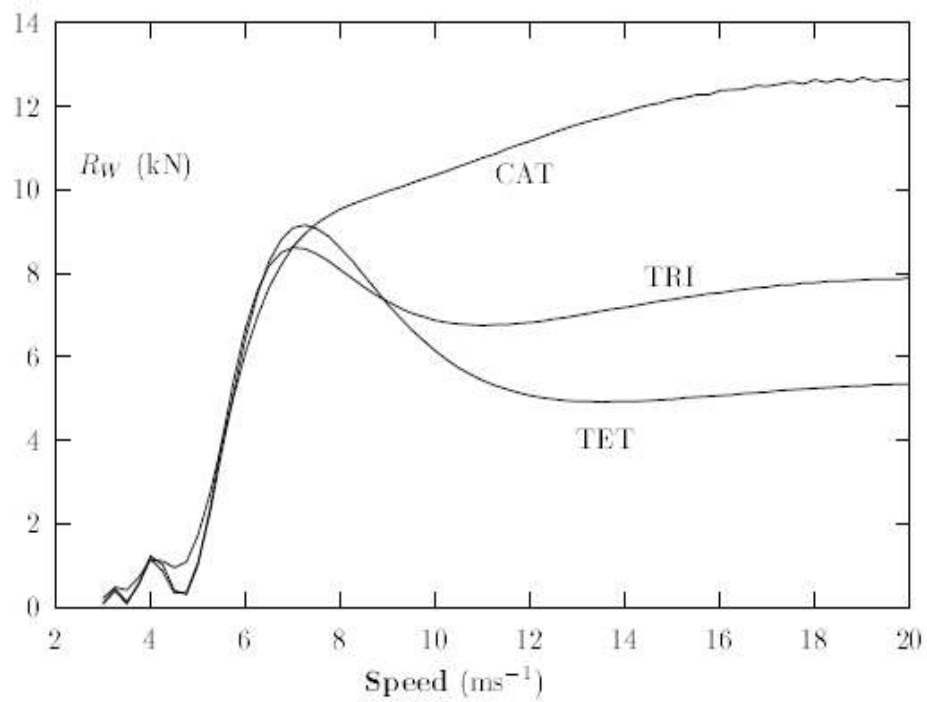
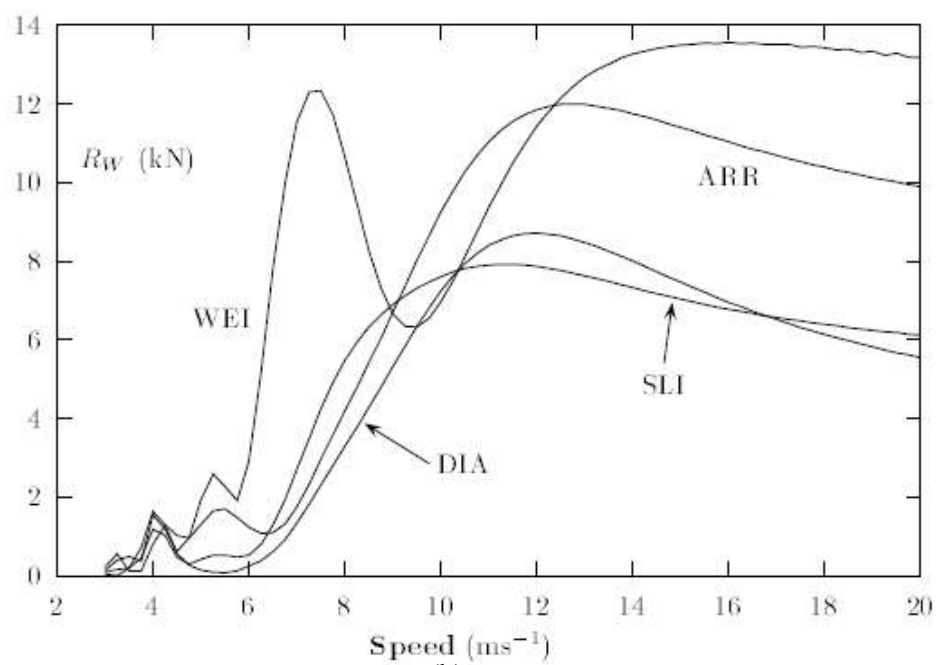


Рис. В.20. (а) – В.20. (с) – Расчеты посредством ShipFlow, Hydros и эксперимент



(a)



(b)

Рис. В.21. (a) – В.21. (b) – Волновое сопротивление в зависимости от скорости

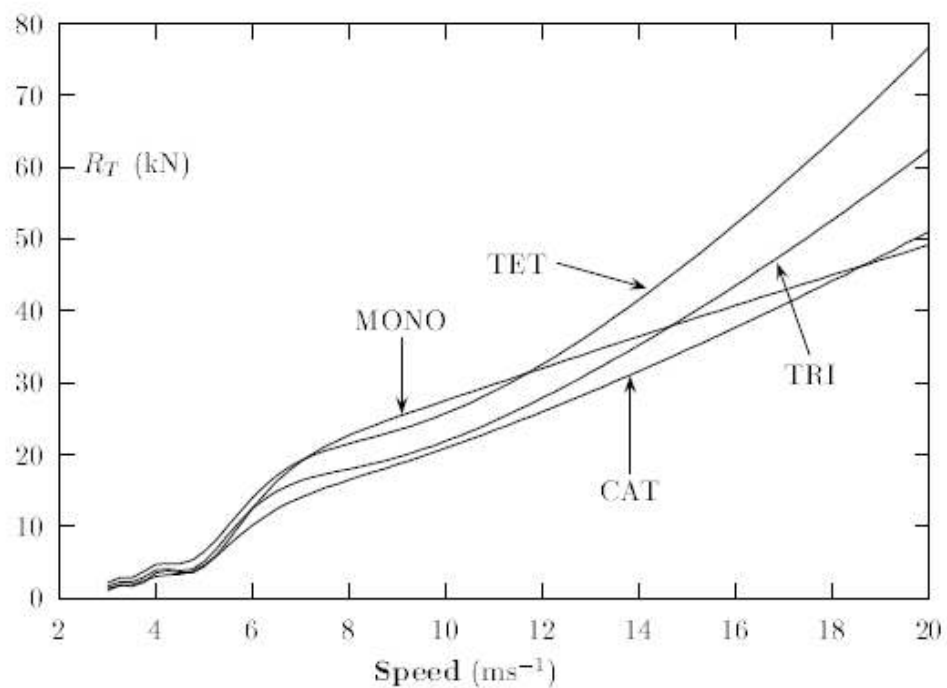


Рис. В.22. – Полное сопротивление к функции от скорости

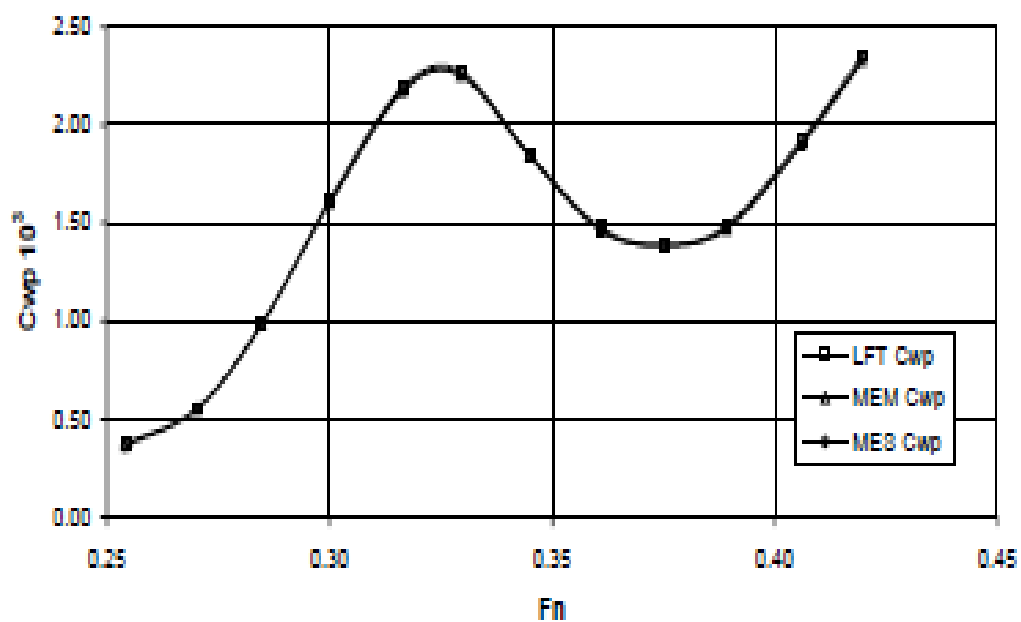


Рис. В.23. – Результаты теоретических расчетов с применением методов LFT, MEM и MES

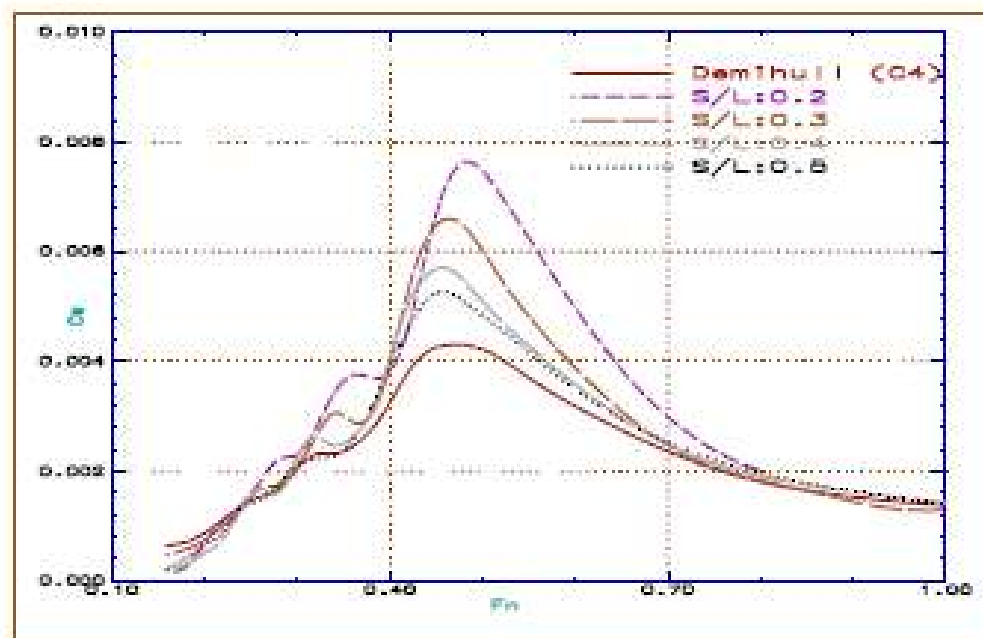


Рис. В.24. – Экспериментальные результаты Инсела-Молланда-Велликома (1994)

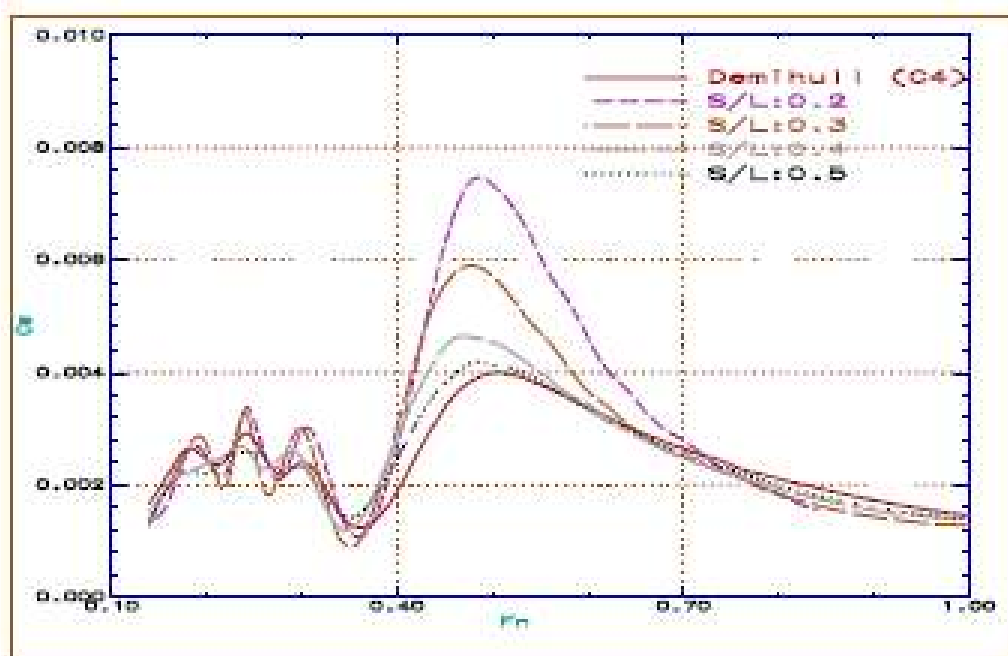


Рис. В.25. – Теоретические результаты Инсела-Молланда-Велликома (1994)

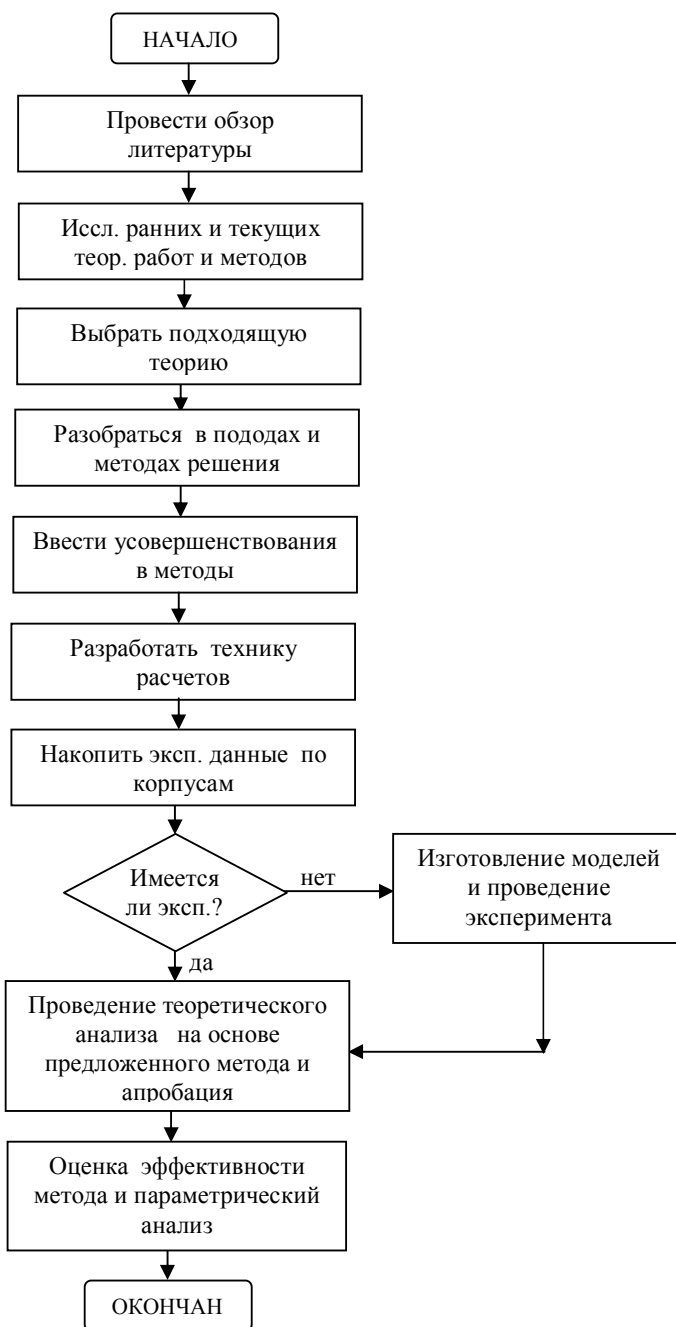


Рис. В.26. – Диаграмма методологии исследовательского процесса

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Диаграмма методологии исследований, блок-схема расчета, алгоритм расчета и характерные результаты расчета для однокорпусных судов

Таблица 1.1 – К расчету интеграла J

Номер шпангоутного сечения FR_n ?						
Скорость натуре и модели, U_t (узлы) = ? ; U_t^2 (фут ² /с ²) = ?						
Угол распространения волн, θ_q = ?						
Безразмерная продольная разбивка, $\xi_n = x_n/\ell$ = ? ; Безразмерная вертикальная разбивка, $\zeta_i = z_i/d$ = ?						
$B_n = \text{SIN}(\ell \lambda_q g \xi_n / U_t^2)_n =$						
ρ (фунт/фут ³) = ; $\lambda = \sec \theta_q =$; $\lambda^2 = \text{Sec}^2 \theta_q =$; Глубина, d_k (фут) = ; g (фут/с ²) = ; Ширина, b (фут) = ; Полудлина, ℓ (фут) = ; MC – Множители Симпсона; Для $n = 0, 1, 2, 3, \dots, m$ (ξ); Для $I = 0, 1, 2, 3, \dots, k$ (ζ); Для $q = 0, 1, 2, 3, \dots, r$ (θ); Для $t = 1, 2, 3, \dots, u$ (U)						
MC _i	z_i	$\zeta_i = z_i/d$	ордината $y_{n,i}$	MC _i · $y_{n,i}$	$A_{n,i} = \text{Exp}(-d \lambda_q^2 \cdot g \cdot \xi_n / U_t^2)_{n,i}$	$f(\text{MC}_i \cdot y_{n,i} \cdot A_{n,i} \cdot B_n)_i$
(a)	(b)	(d) = (b)/(c)	(e)	(f) = (a) · (e)	(g)	(h) = (a) · (e) · (g) · B_n
MC ₀ = 1	z_0	$\zeta_0 = 1$	$y_{0,0}$	MC ₀ · $y_{0,0}$	$A_{0,0}$	$f(\text{MC}_0 \cdot y_{0,0} \cdot A_{0,0} \cdot B_0)_0$
4	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
4	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
MC _k = 1	z_k	$\zeta_k = 0$	$y_{m,k}$	MC _k · $y_{m,k}$	$A_{m,k}$	$f(\text{MC}_k \cdot y_{m,k} \cdot A_{m,k} \cdot B_n)_k$
						$\sum_{i=0}^{i=k} f(\text{MC}_k \cdot y_{m,k} \cdot A_{m,k} \cdot B_n)_{n,q,t}$ $= G_{n,q,t}$

Таблица 1.2 – К расчету интеграла J (a)

FR_n	MC _n	ξ_n	$G_{n,q,t}$	$H_{n,q,t} = G_{n+1,q,t} - G_{n,q,t}$	$K_{n,q,t} = \text{MC}_n G_{n,q,t}$
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
$FR_0 = 0$	MC ₀ = 1	$\xi_0 = 1$	$D_{0,q,t}$	$G_{0,q,t}$	$K_{0,q,t}$
⋮	4	⋮	⋮	$G_{1,q,t} - D_{0,q,t}$	⋮
⋮	2	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
↓	↓	↓	↓	↓	↓
FR_m	MC _m = 1	$\xi_m = -1$	$G_{m,q,t}$	$H_{m,q,t} = G_{m,q,t} - G_{m-1,q,t}$	$K_{m,q,t}$
Суммирование					$\sum_{n=0}^{n=m} K_{n,q,t}$
Интеграл J, $J_{q,t} =$					$d(\zeta/9) \sum_{n=0}^{n=m} K_{n,q,t}$
$J^2 =$					$J_{q,t}^2$

Таблица 1.3 – К расчету интеграла J

Номер шпангоутного сечения FR_n ?						
Скорость натур и модели, U_t (узлы) = ? ; U_t^2 (фут ² /с ²) = ?						
Угол распространения волн, θ_q = ?						
Безразмерная продольная разбивка, $\xi_n = x_n/\ell$ = ? ; Безразмерная вертикальная разбивка, $\zeta_i = z_i/d$ = ?						
$C_n = \cos(\ell \lambda_q g \xi_n / U_t^2)_n =$						
ρ (фунт/фут ³) = ; $\lambda = \sec \theta_q =$; $\lambda^2 = \sec^2 \theta_q =$; Глубина, d_k (фут) = ; g (фут/с ²) = ; Ширина, b (фут) = ; Полудлина, ℓ (фут) = ; MC – Множители Симпсона; Для $n = 0, 1, 2, 3, \dots, m$ (ξ); Для $I = 0, 1, 2, 3, \dots, k$ (ζ); Для $q = 0, 1, 2, 3, \dots, r$ (θ); Для $t = 1, 2, 3, \dots, u$ (U)						
MC_i	z_i	$\zeta_i = z_i/d$	ордината $y_{n,i}$	$MC_{i \cdot y_{n,i}}$	$A_{n,i} = \exp(-d \lambda_q^2 g \xi_n / U_t^2)_{n,i}$	$f(MC_{i \cdot y_{n,i}} \cdot A_{n,i} \cdot C_n)_i$
(a)	(b)	(d) = (b)/(c)	(e)	(f) = (a).(e)	(g)	(h) = (a).(e).(g). C_n
$MC_0 = 1$	z_0	$\zeta_0 = 1$	$y_{0,0}$	$MC_{0 \cdot y_{0,0}}$	$A_{0,0}$	$f(MC_{0 \cdot y_{0,0}} \cdot A_{0,0} \cdot C_0)_0$
4						
2						
4						
2						
▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
$MC_k = 1$	z_k	$\zeta_k = 0$	$y_{m,k}$	$MC_{k \cdot y_{m,k}}$	$A_{m,k}$	$f(MC_{k \cdot y_{m,k}} \cdot A_{m,k} \cdot C_n)_k$
						$\sum_{i=0}^{i=k} f(MC_{k \cdot y_{m,k}} \cdot A_{m,k} \cdot C_n)_{n,q,t}$ $= D_{n,q,t}$

Таблица 1.4 – К расчету интеграла I (a)

FR_n	MC_n	ξ_n	$D_{n,q,t}$	$E_{n,q,t} = D_{n+1,q,t} - D_{n,q,t}$	$F_{n,q,t} = MC_n E_{n,q,t}$
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
$FR_0 = 0$	$MC_0 = 1$	$\xi_0 = 1$	$D_{0,q,t}$	$D_{0,q,t}$	$F_{0,q,t}$
	4			$D_{1,q,t} - D_{0,q,t}$	
	2				
▼	▼	▼	▼	▼	▼
FR_m	$MC_m = 1$	$\xi_m = -1$	$D_{m,q,t}$	$E_{m,q,t} = D_{m,q,t} - D_{m-1,q,t}$	$F_{m,q,t}$
Суммирование					$\sum_{n=0}^{n=m} F_{n,q,t}$
Интеграл I, $I_{q,t} =$					$d(\zeta/9) \cdot \sum_{n=0}^{n=m} F_{n,q,t}$
$I^2 =$					$I_{q,t}^2 =$

Таблица 1.6 – Схема расчета теоретических значений волнового сопротивления судна R_w [N], (усовершенствованная формула Ньюмена для расчета волнового сопротивления однокорпусного судна)

MC_q	$I_{q,t}^2$	θ_q	$\lambda_q = \sec \theta_q$	$\lambda_q^3 = \sec^3 \theta_q$	$fR_{w,q,t}(\theta_q)$
(a)	(b)	(d)	(e)	(f)	(g) = (a).(b).(f)
$MC_0 = 1$	$I_{0,t}^2$	θ_0	λ_0	λ_0^3	$fR_{w,0,t}(\theta_0)$
4	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
▼	▼	▼	▼	▼	▼
$MC_r = 1$	$I_{r,t}^2$	θ_r	λ_r	λ_r^3	$fR_{w,r,t}(\theta_r)$
Суммирование $\sum fR_{w1}$					$M = \sum_0^r fR_{w,q,t}(\theta_q)$
1	$I_{r,t}^2$	θ_r	λ_r	λ_r^3	$fR_{w,r,t}(\theta_r)$
4	$I_{r+1,t}^2$	θ_{r+1}	λ_{r+1}	λ_{r+1}^3	$fR_{w,r+1,t}(\theta_{r+1})$
1	$I_{r+2,t}^2$	$\theta_{r+2} = \theta_{pmax}$	λ_{r+2}	λ_{r+2}^3	$fR_{w,r+2,t}(\theta_{r+2})$
Суммирование $\sum fR_{w2}$					$N = \sum_r^{r+2} A_{r,t}(\theta_r)$
Усоверш. формула Ньюмена R_w [N] = $(0.5\pi\rho U^2) \int A(\theta) ^2 \cos^3 \theta d\theta =$					R_{wT}
Экспериментальный R_w					$R_{wЭ}$

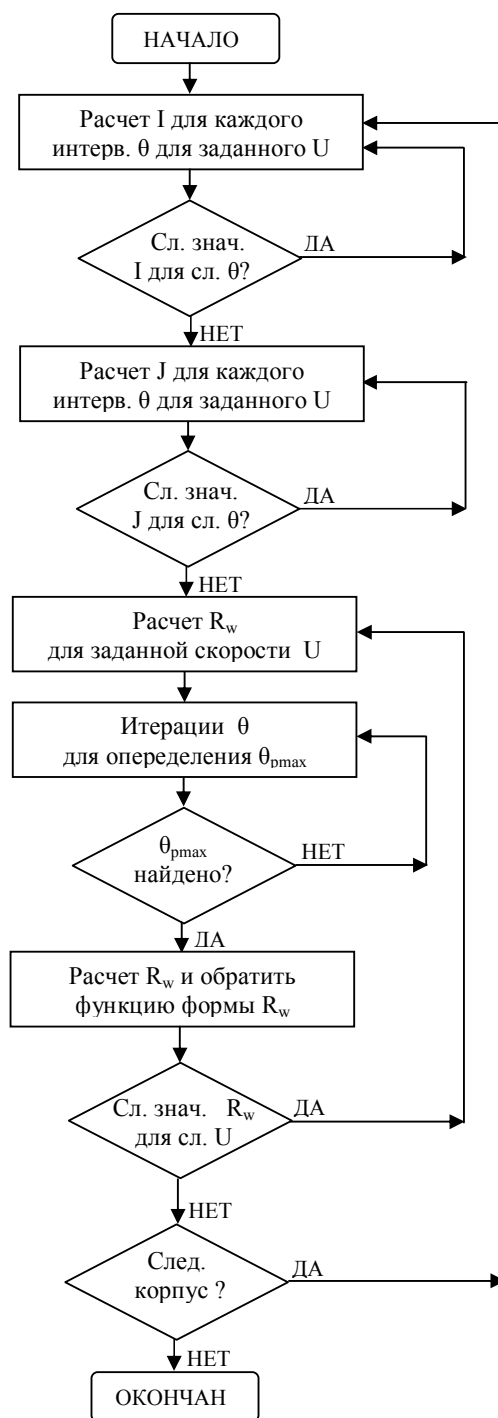


Рис. 1.2 – Блок-схема расчета
(Теоретический расчет для однокорпусного судна)

Таблица 1.23 – Характерный предварительный расчет интеграла J
(Шпангоут 88, $\theta = 88$, $U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$), Иссл. 1

Номер шпангоутного сечения: FR ₈₈						
Скорость природы и модели, $U = 20.04$ уз = 2.962 м/с; U^2 (фут ² /с ²) = 1143.846						
Угол распространения волн, θ_{88}						
Безразмерная продольная разбивка, $\xi_{88} = x_{88}/\ell = -0.27536231884058$;						
Безразмерная вертикальная разбивка, $\zeta_1 = z_i/d = 0.071$						
$B_{88} = \text{SIN}(\ell \lambda_{88} g \xi_{88} / U_1^2)_{88} = -0.502182806$						
ρ (фунт/фут ³) = 64.0509411 ; $\lambda = \sec \theta_{88} = 28.6537$; $\lambda^2 = \sec^2 \theta_{88} = 821.0350021$; Глубина, d_k (фут) = 11.48 ; g (фут/с ²) = 32.174 ; Ширина, b (фут) = 19.406 ; Полудлина, ℓ (фут) = 135.8267717 ; MC – Множители Симпсона; Для $n = 0, 1, 2, 3, \dots, 138$ (ξ); Для $l = 0, 1, 2, 3, \dots, 138$ (ζ); Для $q = 0, 1, 2, 3, \dots, 88$ (θ); Для $t = 1, 2, 3, \dots, 5$ (U)						
MC	z	$\zeta = z/d$	ордината y	MC.y	$A = \text{Exp}$ $(-d\lambda^2 g \zeta / U^2)$	f(MC. y.A.B)
1	3.500	1.000	0.000	0.000	0.00000	0.00000
4	3.250	0.929	1.724	6.896	0.00000	0.00000
2	3.000	0.857	2.798	5.596	0.00000	0.00000
8	2.500	0.714	4.380	35.04	0.00000	0.00000
4	2.000	0.571	5.051	20.204	0.00000	0.00000
8	1.500	0.429	5.446	43.568	0.00000	0.00000
4	1.000	0.286	5.687	22.748	0.00000	0.00000
8	0.500	0.143	5.831	46.648	0.00000	0.00000
2	0.000	0.000	5.915	11.830	1.00000	-5.94082
$\Sigma f(\text{MC.y.A.B})$						-5.94082

Таблица 1.24 – Характерный расчет интеграла J ($\theta = 88$, $U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$),
Исследование 1

FR _n	MC	ξ	$\Sigma f(\text{MC.y.A.B})$	$\Sigma f(\text{MC.y.A.B})_{x+1} - \Sigma f(\text{MC.y.A.B})_x$	$\Sigma [f(\text{MC} \{ \Sigma f(\text{MC.y.A.B})_{x+1} - \Sigma f(\text{MC.y.A.B})_x \})]$
0	1	1.000000000E+00	3.582652722E-02	3.582652722E-02	3.582652722E-02
1	4	9.855072464E-01	2.778880418E-01	2.420615146E-01	9.682460584E-01
2	2	9.710144928E-01	5.278953567E-01	2.500073148E-01	5.000146297E-01
3	4	9.565217391E-01	7.873107291E-01	2.594153724E-01	1.037661490E+00
4	2	9.420289855E-01	1.055678414E+00	2.683676853E-01	5.367353705E-01
5	4	9.275362319E-01	1.330551108E+00	2.748726937E-01	1.099490775E+00
6	2	9.130434783E-01	1.611378585E+00	2.808274768E-01	5.616549537E-01
7	4	8.985507246E-01	1.889673825E+00	2.782952398E-01	1.113180959E+00
8	2	8.840579710E-01	2.164755808E+00	2.750819835E-01	5.501639671E-01
9	4	8.695652174E-01	2.437951258E+00	2.731954494E-01	1.092781798E+00
10	2	8.550724638E-01	2.706628666E+00	2.686774081E-01	5.373548161E-01
11	4	8.405797101E-01	2.972151708E+00	2.655230424E-01	1.062092170E+00
12	2	8.260869565E-01	3.233907412E+00	2.617557043E-01	5.235114085E-01
13	4	8.115942029E-01	3.493292560E+00	2.593851473E-01	1.037540589E+00
14	2	7.971014493E-01	3.747711912E+00	2.544193523E-01	5.088387046E-01

Таблица 1.24 – Характерный расчет интеграла J ($\theta = 88$, $U = 2.962$ м/с, $Fn = 0.362$),
Исследование 1 – продолжение.

15	4	7.826086957E-01	4.000569284E+00	2.528573724E-01	1.011429490E+00
16	2	7.681159420E-01	4.247283953E+00	2.467146684E-01	4.934293367E-01
17	4	7.536231884E-01	4.487287566E+00	2.400036130E-01	9.600144520E-01
18	2	7.391304348E-01	4.722000572E+00	2.347130066E-01	4.694260132E-01
19	4	7.246376812E-01	4.946923785E+00	2.249232128E-01	8.996928513E-01
20	2	7.101449275E-01	5.161561085E+00	2.146372995E-01	4.292745990E-01
21	4	6.956521739E-01	5.367383159E+00	2.058220740E-01	8.232882961E-01
22	2	6.811594203E-01	5.561974371E+00	1.945912123E-01	3.891824246E-01
23	4	6.666666667E-01	5.857743261E+00	2.957688899E-01	1.183075560E+00
24	2	6.521739130E-01	6.135669312E+00	2.779260506E-01	5.558521012E-01
25	4	6.376811594E-01	6.290117792E+00	1.544484807E-01	6.177939227E-01
26	2	6.231884058E-01	6.433528501E+00	1.434107085E-01	2.868214171E-01
27	4	6.086956522E-01	6.561855428E+00	1.283269273E-01	5.133077092E-01
28	2	5.942028986E-01	6.678506625E+00	1.166511966E-01	2.333023932E-01
29	4	5.797101449E-01	6.781366365E+00	1.028597405E-01	4.114389621E-01
30	2	5.652173913E-01	6.870204521E+00	8.883815592E-02	1.776763118E-01
31	4	5.507246377E-01	6.943082378E+00	7.287785708E-02	2.915114283E-01
32	2	5.362318841E-01	7.001620179E+00	5.853780091E-02	1.170756018E-01
33	4	5.217391304E-01	7.042318365E+00	4.069818605E-02	1.627927442E-01
34	2	5.072463768E-01	7.068546949E+00	2.622858366E-02	5.245716733E-02
35	4	4.927536232E-01	7.076996424E+00	8.449475133E-03	3.379790053E-02
36	2	4.782608696E-01	7.069402188E+00	-7.594235626E-03	-1.518847125E-02
37	4	4.637681159E-01	7.044306192E+00	-2.509599588E-02	-1.003839835E-01
38	2	4.492753623E-01	7.004968538E+00	-3.933765492E-02	-7.867530984E-02
39	4	4.347826087E-01	6.948489141E+00	-5.647939615E-02	-2.259175846E-01
40	2	4.202898551E-01	6.875175949E+00	-7.331319218E-02	-1.466263844E-01
41	4	4.057971014E-01	6.788176574E+00	-8.699937523E-02	-3.479975009E-01
42	2	3.913043478E-01	6.686277358E+00	-1.018992163E-01	-2.037984326E-01
43	4	3.768115942E-01	6.571091910E+00	-1.151854474E-01	-4.607417898E-01
44	2	3.623188406E-01	6.440266572E+00	-1.308253382E-01	-2.616506765E-01
45	4	3.478260870E-01	6.295517250E+00	-1.447493216E-01	-5.789972862E-01
46	2	3.333333333E-01	6.137229333E+00	-1.582879175E-01	-3.165758349E-01
47	4	3.188405797E-01	5.966961024E+00	-1.702683085E-01	-6.810732340E-01
48	2	3.043478261E-01	5.783917463E+00	-1.830435613E-01	-3.660871227E-01
49	4	2.898550725E-01	5.588563845E+00	-1.953536186E-01	-7.814144745E-01
50	2	2.753623188E-01	5.382395312E+00	-2.061685326E-01	-4.123370653E-01
51	4	2.608695652E-01	5.164826251E+00	-2.175690606E-01	-8.702762424E-01
52	2	2.463768116E-01	4.937300257E+00	-2.275259940E-01	-4.550519880E-01
53	4	2.318840580E-01	4.700227154E+00	-2.370731033E-01	-9.482924134E-01
54	2	2.173913043E-01	4.453227029E+00	-2.470001247E-01	-4.940002494E-01
55	4	2.028985507E-01	4.198408535E+00	-2.548184939E-01	-1.019273975E+00
56	2	1.884057971E-01	3.934668974E+00	-2.637395615E-01	-5.274791231E-01
57	4	1.739130435E-01	3.663291010E+00	-2.713779639E-01	-1.085511855E+00

Таблица 1.24 –Характерный расчет J ($\theta = 88$, $U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$),
Исследование 1 – продолжение.

58	2	1.594202899E-01	3.384763993E+00	-2.785270169E-01	-5.570540338E-01
59	4	1.449275362E-01	3.066784402E+00	-3.179795913E-01	-1.271918365E+00
60	2	1.304347826E-01	2.808283319E+00	-2.585010824E-01	-5.170021649E-01
61	4	1.159420290E-01	2.511808114E+00	-2.964752056E-01	-1.185900822E+00
62	2	1.014492754E-01	2.210151602E+00	-3.016565117E-01	-6.033130234E-01
63	4	8.695652174E-02	1.904187606E+00	-3.059639964E-01	-1.223855986E+00
64	2	7.246376812E-02	1.594027124E+00	-3.101604815E-01	-6.203209630E-01
65	4	5.797101449E-02	1.280670080E+00	-3.133570443E-01	-1.253428177E+00
66	2	4.347826087E-02	9.640179642E-01	-3.166521155E-01	-6.333042311E-01
67	4	2.898550725E-02	6.447501513E-01	-3.192678129E-01	-1.277071252E+00
68	2	1.449275362E-02	3.232739460E-01	-3.214762054E-01	-6.429524107E-01
69	4	0.000000000E+00	0.000000000E+00	-3.232739460E-01	-1.293095784E+00
70	2	-1.449275362E-02	-3.246029241E-01	-3.246029241E-01	-6.492058483E-01
71	4	-2.898550725E-02	-6.500640262E-01	-3.254611020E-01	-1.301844408E+00
72	2	-4.347826087E-02	-9.759665429E-01	-3.259025167E-01	-6.518050334E-01
73	4	-5.797101449E-02	-1.301892991E+00	-3.259264486E-01	-1.303705794E+00
74	2	-7.246376812E-02	-1.627425788E+00	-3.255327961E-01	-6.510655923E-01
75	4	-8.695652174E-02	-1.951817103E+00	-3.243913151E-01	-1.297565260E+00
76	2	-1.014492754E-01	-2.275258038E+00	-3.234409348E-01	-6.468818696E-01
77	4	-1.159420290E-01	-2.596618989E+00	-3.213609519E-01	-1.285443808E+00
78	2	-1.304347826E-01	-2.916313189E+00	-3.196941993E-01	-6.393883986E-01
79	4	-1.449275362E-01	-3.233546613E+00	-3.172334241E-01	-1.268933697E+00
80	2	-1.594202899E-01	-3.547914056E+00	-3.143674433E-01	-6.287348865E-01
81	4	-1.739130435E-01	-3.859014483E+00	-3.111004271E-01	-1.244401709E+00
82	2	-1.884057971E-01	-4.167156129E+00	-3.081416456E-01	-6.162832912E-01
83	4	-2.028985507E-01	-4.472102735E+00	-3.049466059E-01	-1.219786424E+00
84	2	-2.173913043E-01	-4.773620493E+00	-3.015177577E-01	-6.030355154E-01
85	4	-2.318840580E-01	-5.071478222E+00	-2.978577299E-01	-1.191430920E+00
86	2	-2.463768116E-01	-5.365447551E+00	-2.939693288E-01	-5.879386577E-01
87	4	-2.608695652E-01	-5.655303087E+00	-2.898555358E-01	-1.159422143E+00
88	2	-2.753623188E-01	-5.940822592E+00	-2.855195048E-01	-5.710390096E-01
89	4	-2.898550725E-01	-6.221787152E+00	-2.809645605E-01	-1.123858242E+00
90	2	-3.043478261E-01	-6.497981347E+00	-2.761941952E-01	-5.523883903E-01
91	4	-3.188405797E-01	-6.769193414E+00	-2.712120664E-01	-1.084848265E+00
92	2	-3.333333333E-01	-7.035215408E+00	-2.660219940E-01	-5.320439880E-01
93	4	-3.478260870E-01	-7.295843365E+00	-2.606279574E-01	-1.042511830E+00
94	2	-3.623188406E-01	-7.550877458E+00	-2.550340923E-01	-5.100681846E-01
95	4	-3.768115942E-01	-7.800122145E+00	-2.492446875E-01	-9.969787502E-01
96	2	-3.913043478E-01	-8.043386327E+00	-2.432641821E-01	-4.865283641E-01
97	4	-4.057971014E-01	-8.280483488E+00	-2.370971612E-01	-9.483886448E-01

Таблица 1.24 –Характерный расчет J ($\theta = 88$, $U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$),
Исследование 1 – продолжение.

98	2	-4.202898551E-01	-8.511231842E+00	-2.307483533E-01	-4.614967066E-01
99	4	-4.347826087E-01	-8.735454468E+00	-2.242226262E-01	-8.968905047E-01
100	2	-4.492753623E-01	-8.952979451E+00	-2.175249832E-01	-4.350499664E-01
101	4	-4.637681159E-01	-9.163640011E+00	-2.106605596E-01	-8.426422383E-01
102	2	-4.782608696E-01	-9.367274629E+00	-2.036346184E-01	-4.072692368E-01
103	4	-4.927536232E-01	-9.563727176E+00	-1.964525466E-01	-7.858101864E-01
104	2	-5.072463768E-01	-9.752847026E+00	-1.891198508E-01	-3.782397016E-01
105	4	-5.217391304E-01	-9.934489180E+00	-1.816421531E-01	-7.265686126E-01
106	2	-5.362318841E-01	-1.010851437E+01	-1.740251869E-01	-3.480503738E-01
107	4	-5.507246377E-01	-1.027478916E+01	-1.662747922E-01	-6.650991687E-01
108	2	-5.652173913E-01	-1.043318607E+01	-1.583969113E-01	-3.167938226E-01
109	4	-5.797101449E-01	-1.058358365E+01	-1.503975845E-01	-6.015903378E-01
110	2	-5.942028986E-01	-1.072586660E+01	-1.422829448E-01	-2.845658897E-01
111	4	-6.086956522E-01	-1.085992581E+01	-1.340592141E-01	-5.362368565E-01
112	2	-6.231884058E-01	-1.098565851E+01	-1.257326976E-01	-2.514653952E-01
113	4	-6.376811594E-01	-1.110109120E+01	-1.154326926E-01	-4.617307704E-01
114	2	-6.521739130E-01	-1.120986973E+01	-1.087785241E-01	-2.175570482E-01
115	4	-6.666666667E-01	-1.131005343E+01	-1.001836987E-01	-4.007347950E-01
116	2	-6.811594203E-01	-1.140156549E+01	-9.151206062E-02	-1.830241212E-01
117	4	-6.956521739E-01	-1.148433575E+01	-8.277025842E-02	-3.310810337E-01
118	2	-7.101449275E-01	-1.155830074E+01	-7.396499465E-02	-1.479299893E-01
119	4	-7.246376812E-01	-1.162340376E+01	-6.510302048E-02	-2.604120819E-01
120	2	-7.391304348E-01	-1.167959489E+01	-5.619113056E-02	-1.123822611E-01
121	4	-7.536231884E-01	-1.172683105E+01	-4.723615780E-02	-1.889446312E-01
122	2	-7.681159420E-01	-1.176507602E+01	-3.824496816E-02	-7.648993632E-02
123	4	-7.826086957E-01	-1.179430047E+01	-2.922445536E-02	-1.168978214E-01
124	2	-7.971014493E-01	-1.181448201E+01	-2.018153560E-02	-4.036307119E-02
125	4	-8.115942029E-01	-1.182560515E+01	-1.112314226E-02	-4.449256904E-02
126	2	-8.260869565E-01	-1.182766137E+01	-2.056220595E-03	-4.112441190E-03
127	4	-8.405797101E-01	-1.182064909E+01	7.012277615E-03	2.804911046E-02
128	2	-8.550724638E-01	-1.180457369E+01	1.607539938E-02	3.215079875E-02
129	4	-8.695652174E-01	-1.177944750E+01	2.512619581E-02	1.005047833E-01
130	2	-8.840579710E-01	-1.174330376E+01	3.614374201E-02	7.228748403E-02
131	4	-8.985507246E-01	-1.170212670E+01	4.117705531E-02	1.647082212E-01
132	2	-9.130434783E-01	-1.164802148E+01	5.410521862E-02	1.082104372E-01
133	4	-9.275362319E-01	-1.158304507E+01	6.497641645E-02	2.599056658E-01
134	2	-9.420289855E-01	-6.258108386E+00	5.324936680E+00	1.064987336E+01
135	4	-9.565217391E-01	-5.803273187E-01	5.677781067E+00	2.271112427E+01

Таблица 1.24 – Характерный расчет J ($\theta = 88$, $U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$),
Исследование 1 – продолжение.

136	2	-9.710144928E-01	0.000000000E+00	5.803273187E-01	1.160654637E+00
137	4	-9.855072464E-01	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00
138	1	-1.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00
$\Sigma[f[MC \{ \Sigma f(MC.y.A.B)_{x+1} - \Sigma f(MC.y.A.B)_x \}]]$					-6.916438287E-01
$J = bd(w/9)[\Sigma[f[MC \{ \Sigma f(MC.y.A.B)_{x+1} - \Sigma f(MC.y.A.B)_x \}]]]$					-6.303257457E-02
J^2					3.973105457E-03

Таблица 1.25 – Характерный предварительный расчет интеграла I
(Шпангоут 88, $\theta = 88$, $U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$, $F_n = 0.362$), Исследование 2

Номер шпангоутного сечения: FR ₈₈						
Скорость натуры и модели, $U = 20.04$ уз = 2.962 м/с ; U^2 (фут ² /с ²)= 1143.846						
Угол распространения волн, θ_{88}						
Безразмерная продольная разбивка, $\xi_{88} = x_{88}/\ell = -0.27536231884058$;						
Безразмерная вертикальная разбивка, $\zeta_1 = z_i/d = 0.071$						
$C_{88} = \cos(\ell \lambda_{88} g \xi_{88} / U_1^2)_{88} = 0.864761487$						
ρ (фунт/фут ³) = 64.0509411 ; $\lambda = \sec \theta_{88} = 28.6537$; $\lambda^2 = \sec^2 \theta_{88} = 821.0350021$; Глубина, d_k (фут) = 11.48 ; g (фут /с ²)= 32.174 ; Ширина, b (фут) = 19.406 ; Полудлина, ℓ (фут) = 135.8267717; MC – Множители Симпсона; Для $n = 0, 1, 2, 3, \dots, 138$ (ξ); Для $I = 0, 1, 2, 3, \dots, 138$ (ζ); Для $q = 0, 1, 2, 3, \dots, 88$ (θ); Для $t = 1, 2, 3, \dots, 5$ (U)						
MC	z	$\zeta = z/d$	ордината y	MC.y	$A = \exp$ $(-d\lambda^2 g \zeta / U^2)$	f(MC. Y.A.C)
1	3.500	1.000	0.000	0.000	0.00000	0.00000
4	3.250	0.929	1.724	6.896	0.00000	0.00000
2	3.000	0.857	2.798	5.596	0.00000	0.00000
8	2.500	0.714	4.380	35.04	0.00000	0.00000
4	2.000	0.571	5.051	20.204	0.00000	0.00000
8	1.500	0.429	5.446	43.568	0.00000	0.00000
4	1.000	0.286	5.687	22.748	0.00000	0.00000
8	0.500	0.143	5.831	46.648	0.00000	0.00000
2	0.000	0.000	5.915	11.830	1.00000	10.23013
$\Sigma f(MC.y.A.C)$						10.23013

Таблица 1.26 – Характерный расчет интеграла I ($\theta = 88$, $U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$),
Исследование 2

FR _n	MC	ξ	$\Sigma f(MC.y.A.C)$	$\Sigma f(MC.y.A.C)_{x+1}$ $- \Sigma f(MC.y.A.C)_x$	$\Sigma[f[MC \{ \Sigma f(MC.y.A.C)_{x+1}$ $- \Sigma f(MC.y.A.C)_x \}]]$
0	1	1.000000000E+00	-1.266727862E-02	-1.266727862E-02	-1.266727862E-02
1	4	9.855072464E-01	-8.967851590E-02	-7.701123728E-02	-3.080449491E-01
2	2	9.710144928E-01	-1.543583247E-01	-6.467980881E-02	-1.293596176E-01
3	4	9.565217391E-01	-2.067312649E-01	-5.237294014E-02	-2.094917606E-01

Таблица 1.26 –Характерный расчет интеграла I ($\theta = 88$, 2.962 м/с, $F_n = 0.362$),
Исследование 2 – продолжение.

4	2	9.420289855E-01	-2.461688150E-01	-3.943755014E-02	-7.887510029E-02
5	4	9.275362319E-01	-2.716574109E-01	-2.548859589E-02	-1.019543836E-01
6	2	9.130434783E-01	-2.827632511E-01	-1.110584022E-02	-2.221168044E-02
7	4	8.985507246E-01	-2.779079637E-01	4.855287461E-03	1.942114985E-02
8	2	8.840579710E-01	-2.573563496E-01	2.055161405E-02	4.110322810E-02
9	4	8.695652174E-01	-2.215799300E-01	3.577641961E-02	1.431056784E-01
10	2	8.550724638E-01	-1.706026553E-01	5.097727465E-02	1.019545493E-01
11	4	8.405797101E-01	-1.048342693E-01	6.576838606E-02	2.630735442E-01
12	2	8.260869565E-01	-2.447137546E-02	8.036289382E-02	1.607257876E-01
13	4	8.115942029E-01	7.030713264E-02	9.477850810E-02	3.791140324E-01
14	2	7.971014493E-01	1.793304917E-01	1.090233590E-01	2.180467181E-01
15	4	7.826086957E-01	3.026374084E-01	1.233069168E-01	4.932276671E-01
16	2	7.681159420E-01	4.398625067E-01	1.372250983E-01	2.744501965E-01
17	4	7.536231884E-01	5.906998412E-01	1.508373345E-01	6.033493381E-01
18	2	7.391304348E-01	7.551387919E-01	1.644389507E-01	3.288779013E-01
19	4	7.246376812E-01	9.322559004E-01	1.771171086E-01	7.084684343E-01
20	2	7.101449275E-01	1.121521810E+00	1.892659092E-01	3.785318184E-01
21	4	6.956521739E-01	1.322868863E+00	2.013470531E-01	8.053882124E-01
22	2	6.811594203E-01	1.535363506E+00	2.124946436E-01	4.249892871E-01
23	4	6.666666667E-01	1.792963995E+00	2.576004892E-01	1.030401957E+00
24	2	6.521739130E-01	2.065487376E+00	2.725233803E-01	5.450467605E-01
25	4	6.376811594E-01	2.313270879E+00	2.477835033E-01	9.911340132E-01
26	2	6.231884058E-01	2.570388109E+00	2.571172297E-01	5.142344595E-01
27	4	6.086956522E-01	2.834776418E+00	2.643883094E-01	1.057553238E+00
28	2	5.942028986E-01	3.107330891E+00	2.725544725E-01	5.451089449E-01
29	4	5.797101449E-01	3.386660630E+00	2.793297391E-01	1.117318956E+00
30	2	5.652173913E-01	3.672109726E+00	2.854490960E-01	5.708981921E-01
31	4	5.507246377E-01	3.962025125E+00	2.899153990E-01	1.159661596E+00
32	2	5.362318841E-01	4.256636098E+00	2.946109728E-01	5.892219456E-01
33	4	5.217391304E-01	4.553103122E+00	2.964670248E-01	1.185868099E+00
34	2	5.072463768E-01	4.852743557E+00	2.996404348E-01	5.992808696E-01
35	4	4.927536232E-01	5.152537008E+00	2.997934504E-01	1.199173802E+00
36	2	4.782608696E-01	5.452773304E+00	3.002362959E-01	6.004725917E-01
37	4	4.637681159E-01	5.751398636E+00	2.986253322E-01	1.194501329E+00
38	2	4.492753623E-01	6.050119981E+00	2.987213456E-01	5.974426912E-01
39	4	4.347826087E-01	6.345596792E+00	2.954768111E-01	1.181907244E+00
40	2	4.202898551E-01	6.636948973E+00	2.913521804E-01	5.827043607E-01
41	4	4.057971014E-01	6.926172305E+00	2.892233323E-01	1.156893329E+00
42	2	3.913043478E-01	7.211189298E+00	2.850169932E-01	5.700339863E-01
43	4	3.768115942E-01	7.492790342E+00	2.816010436E-01	1.126404174E+00
44	2	3.623188406E-01	7.767307544E+00	2.745172020E-01	5.490344041E-01
45	4	3.478260870E-01	8.035529015E+00	2.682214710E-01	1.072885884E+00
46	2	3.333333333E-01	8.296795533E+00	2.612665180E-01	5.225330359E-01
47	4	3.188405797E-01	8.552108520E+00	2.553129868E-01	1.021251947E+00

Таблица 1.26 –Характерный расчет интеграла I ($\theta = 88$, 2.962 м/с, $F_n = 0.362$),
Исследование 2 – продолжение.

48	2	3.043478261E-01	8.799272628E+00	2.471641082E-01	4.943282164E-01
49	4	2.898550725E-01	9.037689426E+00	2.384167979E-01	9.536671914E-01
50	2	2.753623188E-01	9.268513619E+00	2.308241933E-01	4.616483867E-01
51	4	2.608695652E-01	9.489519787E+00	2.210061683E-01	8.840246731E-01
52	2	2.463768116E-01	9.701961769E+00	2.124419818E-01	4.248839636E-01
53	4	2.318840580E-01	9.905410678E+00	2.034489090E-01	8.137956358E-01
54	2	2.173913043E-01	1.009762670E+01	1.922160246E-01	3.844320492E-01
55	4	2.028985507E-01	1.028185789E+01	1.842311922E-01	7.369247688E-01
56	2	1.884057971E-01	1.045405568E+01	1.721977806E-01	3.443955613E-01
57	4	1.739130435E-01	1.061570530E+01	1.616496226E-01	6.465984905E-01
58	2	1.594202899E-01	1.076648358E+01	1.507782834E-01	3.015565668E-01
59	4	1.449275362E-01	1.079066066E+01	2.417707635E-02	9.670830538E-02
60	2	1.304347826E-01	1.103424401E+01	2.435833488E-01	4.871666976E-01
61	4	1.159420290E-01	1.115264292E+01	1.183989088E-01	4.735956352E-01
62	2	1.014492754E-01	1.125912545E+01	1.064825344E-01	2.129650688E-01
63	4	8.695652174E-02	1.135545092E+01	9.632546863E-02	3.853018745E-01
64	2	7.246376812E-02	1.143947453E+01	8.402361171E-02	1.680472234E-01
65	4	5.797101449E-02	1.151500239E+01	7.552786434E-02	3.021114573E-01
66	2	4.347826087E-02	1.157793563E+01	6.293323165E-02	1.258664633E-01
67	4	2.898550725E-02	1.163014193E+01	5.220630080E-02	2.088252032E-01
68	2	1.449275362E-02	1.167152389E+01	4.138196475E-02	8.276392950E-02
69	4	0.000000000E+00	1.170000000E+01	2.847610824E-02	1.139044330E-01
70	2	-1.449275362E-02	1.171950549E+01	1.950549049E-02	3.901098098E-02
71	4	-2.898550725E-02	1.172599475E+01	6.489254599E-03	2.595701840E-02
72	2	-4.347826087E-02	1.172143905E+01	-4.555699172E-03	-9.111398344E-03
73	4	-5.797101449E-02	1.170582584E+01	-1.561320411E-02	-6.245281644E-02
74	2	-7.246376812E-02	1.167915876E+01	-2.666708333E-02	-5.333416666E-02
75	4	-8.695652174E-02	1.163948513E+01	-3.967363252E-02	-1.586945301E-01
76	2	-1.014492754E-01	1.159079570E+01	-4.868943012E-02	-9.737886024E-02
77	4	-1.159420290E-01	1.152921046E+01	-6.158523616E-02	-2.463409446E-01
78	2	-1.304347826E-01	1.145871255E+01	-7.049790612E-02	-1.409958122E-01
79	4	-1.449275362E-01	1.137742327E+01	-8.128928191E-02	-3.251571276E-01
80	2	-1.594202899E-01	1.128544221E+01	-9.198106276E-02	-1.839621255E-01
81	4	-1.739130435E-01	1.118288457E+01	-1.025576428E-01	-4.102305713E-01
82	2	-1.884057971E-01	1.107175279E+01	-1.111317781E-01	-2.222635562E-01
83	4	-2.028985507E-01	1.095213208E+01	-1.196207065E-01	-4.784828260E-01
84	2	-2.173913043E-01	1.082411416E+01	-1.280179194E-01	-2.560358387E-01
85	4	-2.318840580E-01	1.068779718E+01	-1.363169784E-01	-5.452679136E-01
86	2	-2.463768116E-01	1.054328566E+01	-1.445115205E-01	-2.890230411E-01
87	4	-2.608695652E-01	1.039069040E+01	-1.525952629E-01	-6.103810516E-01

Таблица 1.26 – Характерный расчет интеграла I ($\theta = 88$, $U = 2.962$ м/с, $Fn = 0.362$),
Исследование 2 – продолжение.

88	2	-2.753623188E-01	1.023012839E+01	-1.605620075E-01	-3.211240150E-01
89	4	-2.898550725E-01	1.006172275E+01	-1.684056461E-01	-6.736225843E-01
90	2	-3.043478261E-01	9.885602582E+00	-1.761201648E-01	-3.522403295E-01
91	4	-3.188405797E-01	9.701902933E+00	-1.836996487E-01	-7.347985948E-01
92	2	-3.333333333E-01	9.510764647E+00	-1.911382865E-01	-3.822765731E-01
93	4	-3.478260870E-01	9.312334272E+00	-1.984303749E-01	-7.937214997E-01
94	2	-3.623188406E-01	9.106763949E+00	-2.055703229E-01	-4.111406458E-01
95	4	-3.768115942E-01	8.894211293E+00	-2.125526561E-01	-8.502106243E-01
96	2	-3.913043478E-01	8.674839272E+00	-2.193720210E-01	-4.387440420E-01
97	4	-4.057971014E-01	8.448816083E+00	-2.260231891E-01	-9.040927566E-01
98	2	-4.202898551E-01	8.216315022E+00	-2.325010609E-01	-4.650021218E-01
99	4	-4.347826087E-01	7.977514352E+00	-2.388006696E-01	-9.552026782E-01
100	2	-4.492753623E-01	7.732597167E+00	-2.449171851E-01	-4.898343702E-01
101	4	-4.637681159E-01	7.481751249E+00	-2.508459179E-01	-1.003383671E+00
102	2	-4.782608696E-01	7.225168927E+00	-2.565823222E-01	-5.131646444E-01
103	4	-4.927536232E-01	6.963046927E+00	-2.621219999E-01	-1.048487999E+00
104	2	-5.072463768E-01	6.695586224E+00	-2.674607035E-01	-5.349214070E-01
105	4	-5.217391304E-01	6.422991884E+00	-2.725943398E-01	-1.090377359E+00
106	2	-5.362318841E-01	6.145472911E+00	-2.775189727E-01	-5.550379454E-01
107	4	-5.507246377E-01	5.863242085E+00	-2.822308264E-01	-1.128923306E+00
108	2	-5.652173913E-01	5.576515797E+00	-2.867262882E-01	-5.734525765E-01
109	4	-5.797101449E-01	5.285513885E+00	-2.910019114E-01	-1.164007646E+00
110	2	-5.942028986E-01	4.990459467E+00	-2.950544178E-01	-5.901088357E-01
111	4	-6.086956522E-01	4.691578767E+00	-2.988807002E-01	-1.195522801E+00
112	2	-6.231884058E-01	4.389100942E+00	-3.024778250E-01	-6.049556500E-01
113	4	-6.376811594E-01	4.082567585E+00	-3.065333567E-01	-1.226133427E+00
114	2	-6.521739130E-01	3.773646074E+00	-3.089215118E-01	-6.178430237E-01
115	4	-6.666666667E-01	3.461831234E+00	-3.118148397E-01	-1.247259359E+00
116	2	-6.811594203E-01	3.147362141E+00	-3.144690931E-01	-6.289381863E-01
117	4	-6.956521739E-01	2.830479904E+00	-3.168822370E-01	-1.267528948E+00
118	2	-7.101449275E-01	2.511427483E+00	-3.190524210E-01	-6.381048420E-01
119	4	-7.246376812E-01	2.190449501E+00	-3.209779813E-01	-1.283911925E+00
120	2	-7.391304348E-01	1.867792060E+00	-3.226574416E-01	-6.453148832E-01
121	4	-7.536231884E-01	1.543702546E+00	-3.240895141E-01	-1.296358057E+00
122	2	-7.681159420E-01	1.218429445E+00	-3.252731009E-01	-6.505462019E-01
123	4	-7.826086957E-01	8.922221503E-01	-3.262072945E-01	-1.304829178E+00
124	2	-7.971014493E-01	5.653307717E-01	-3.268913786E-01	-6.537827572E-01
125	4	-8.115942029E-01	2.380059430E-01	-3.273248287E-01	-1.309299315E+00
126	2	-8.260869565E-01	-8.950136949E-02	-3.275073125E-01	-6.550146250E-01
127	4	-8.405797101E-01	-4.169400595E-01	-3.274386900E-01	-1.309754760E+00

Таблица 1.26 – Характерный расчет интеграла I ($\theta = 88$, $U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$),
Исследование 2 – продолжение.

128	2	-8.550724638E-01	-7.440590735E-01	-3.271190140E-01	-6.542380280E-01
129	4	-8.695652174E-01	-1.070607603E+00	-3.265485294E-01	-1.306194118E+00
130	2	-8.840579710E-01	-1.396099170E+00	-3.254915670E-01	-6.509831340E-01
131	4	-8.985507246E-01	-1.720992353E+00	-3.248931830E-01	-1.299572732E+00
132	2	-9.130434783E-01	-2.043984235E+00	-3.229918816E-01	-6.459837632E-01
133	4	-9.275362319E-01	-2.364899788E+00	-3.209155531E-01	-1.283662212E+00
134	2	-9.420289855E-01	-1.459299636E+00	9.056001518E-01	1.811200304E+00
135	4	-9.565217391E-01	-1.523817677E-01	1.306917868E+00	5.227671472E+00
136	2	-9.710144928E-01	0.000000000E+00	1.523817677E-01	3.047635354E-01
137	4	-9.855072464E-01	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00
138	1	-1.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00	0.000000000E+00
$\Sigma[f[MC \{ \Sigma f(SM.y.A.C)_{x+1} - \Sigma f(MC.y.A.C)_x \}]]$					-5.394194275E-01
$I = d(\zeta/9)[\Sigma[f[MC \{ \Sigma f(MC.y.A.C)_{x+1} - \Sigma f(MC.y.A.C)_x \}]]]$					-4.915968866E-02
I^2					2.416674990E-03

Таблица 1.27 – Характерный расчет волнового сопротивления судна R_w [N],
Исследование 1 ($U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$)

MC	I^2	J^2	θ	$\sec\theta$	$\sec^3\theta$	fR_w
1	6.689769466E+00	2.114020992E-02	0	1.000000000E+00	1.000000000E+00	6.710909675E+00
4	6.689448107E+00	2.114634603E-02	1	1.000152328E+00	1.000457054E+00	2.685464622E+01
2	6.688483327E+00	2.116304946E-02	2	1.000609544E+00	1.001829748E+00	1.344384667E+01
4	6.686873006E+00	2.119034878E-02	3	1.001372346E+00	1.004122691E+00	2.694287450E+01
2	6.684613600E+00	2.122829072E-02	4	1.002441898E+00	1.007343597E+00	1.351017379E+01
4	6.681700128E+00	2.127694030E-02	5	1.003819838E+00	1.011503342E+00	2.712033482E+01
2	6.678126147E+00	2.133638097E-02	6	1.005508280E+00	1.016616029E+00	1.362156199E+01
4	6.673883724E+00	2.140671484E-02	7	1.007509825E+00	1.022699092E+00	2.738906982E+01
2	6.668963399E+00	2.148806295E-02	8	1.009827573E+00	1.029773410E+00	1.377929804E+01
4	6.663354147E+00	2.158056555E-02	9	1.012465126E+00	1.037863452E+00	2.775219768E+01
2	6.657043322E+00	2.168438246E-02	10	1.015426612E+00	1.046997448E+00	1.398522172E+01
4	6.650016604E+00	2.179969348E-02	11	1.018716695E+00	1.057207586E+00	2.821397920E+01
2	6.642257929E+00	2.192669881E-02	12	1.022340595E+00	1.068530241E+00	1.424176562E+01
4	6.633749421E+00	2.206561953E-02	13	1.026304108E+00	1.081006242E+00	2.877991041E+01
2	6.624471300E+00	2.221669816E-02	14	1.030613629E+00	1.094681162E+00	1.455200828E+01
4	6.614401797E+00	2.238019917E-02	15	1.035276180E+00	1.109605666E+00	2.945684363E+01
2	6.603517043E+00	2.255640961E-02	16	1.040299436E+00	1.125835889E+00	1.491974260E+01
4	6.591790960E+00	2.274563973E-02	17	1.045691756E+00	1.143433872E+00	3.025314077E+01
2	6.579195129E+00	2.294822363E-02	18	1.051462224E+00	1.162468045E+00	1.534956135E+01

Таблица 1.27 – Характерный расчет волнового сопротивления судна R_w [N],
Исследование 1 ($U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$) – продолжение.

4	6.565698652E+00	2.316451996E-02	19	1.057620681E+00	1.183013781E+00	3.117886374E+01
2	6.551267998E+00	2.339491258E-02	20	1.064177772E+00	1.205154011E+00	1.584696276E+01
4	6.535866833E+00	2.363981128E-02	21	1.071144994E+00	1.228979919E+00	3.224600779E+01
2	6.519455833E+00	2.389965245E-02	22	1.078534743E+00	1.254591725E+00	1.641847929E+01
4	6.501992479E+00	2.417489975E-02	23	1.086360377E+00	1.282099562E+00	3.346878536E+01
2	6.483430834E+00	2.446604476E-02	24	1.094636279E+00	1.311624476E+00	1.707183367E+01
4	6.463721296E+00	2.477360749E-02	25	1.103377919E+00	1.343299538E+00	3.486396884E+01
2	6.442810331E+00	2.509813687E-02	26	1.112601940E+00	1.377271115E+00	1.781612701E+01
4	6.420640175E+00	2.544021113E-02	27	1.122326238E+00	1.413700292E+00	3.645130290E+01
2	6.397148513E+00	2.580043790E-02	28	1.132570051E+00	1.452764502E+00	1.866206446E+01
4	6.372268127E+00	2.617945426E-02	29	1.143354068E+00	1.494659352E+00	3.825399806E+01
2	6.345926506E+00	2.657792635E-02	30	1.154700538E+00	1.539600718E+00	1.962222480E+01
4	6.318045425E+00	2.699654874E-02	31	1.166633397E+00	1.587827117E+00	4.029931881E+01
2	6.288540483E+00	2.743604329E-02	32	1.179178403E+00	1.639602416E+00	2.071138074E+01
4	6.257320594E+00	2.789715751E-02	33	1.192363293E+00	1.695218929E+00	4.261928043E+01
2	6.224287440E+00	2.838066217E-02	34	1.206217949E+00	1.755000964E+00	2.194687710E+01
4	6.189334859E+00	2.888734812E-02	35	1.220774589E+00	1.819308890E+00	4.525146777E+01
2	6.152348193E+00	2.941802199E-02	36	1.236067977E+00	1.888543820E+00	2.334907276E+01
4	6.113203566E+00	2.997350066E-02	37	1.252135658E+00	1.963153011E+00	4.823998623E+01
2	6.071767102E+00	3.055460413E-02	38	1.269018215E+00	2.043636109E+00	2.494184997E+01
4	6.027894076E+00	3.116214642E-02	39	1.286759566E+00	2.130552383E+00	5.163654670E+01
2	5.981427986E+00	3.179692414E-02	40	1.305407289E+00	2.224529146E+00	2.675318815E+01
4	5.932199561E+00	3.245970217E-02	41	1.325012993E+00	2.326271560E+00	5.550166884E+01
2	5.880025678E+00	3.315119580E-02	42	1.345632730E+00	2.436574112E+00	2.881578737E+01
4	5.824708207E+00	3.387204859E-02	43	1.367327461E+00	2.556334072E+00	5.990595327E+01
2	5.766032776E+00	3.462280504E-02	44	1.390163591E+00	2.686567334E+00	3.116770360E+01
4	5.703767456E+00	3.540387686E-02	45	1.414213562E+00	2.828427125E+00	6.493131149E+01
2	5.637661384E+00	3.621550167E-02	46	1.439556540E+00	2.983226171E+00	3.385291604E+01
4	5.567443329E+00	3.705769219E-02	47	1.466279186E+00	3.152463079E+00	7.067193018E+01
2	5.492820222E+00	3.793017425E-02	48	1.494476550E+00	3.337853831E+00	3.692167280E+01
4	5.413475694E+00	3.883231107E-02	49	1.524253087E+00	3.541369556E+00	7.723455032E+01
2	5.329068657E+00	3.976301090E-02	50	1.555723827E+00	3.765282014E+00	4.043033063E+01
4	5.239231993E+00	4.072061482E-02	51	1.589015729E+00	4.012218614E+00	8.473729654E+01
2	5.143571466E+00	4.170276041E-02	52	1.624269245E+00	4.285229282E+00	4.444017790E+01
4	5.041664957E+00	4.270621671E-02	53	1.661640141E+00	4.587868120E+00	9.330569767E+01
2	4.933062228E+00	4.372668479E-02	54	1.701301617E+00	4.924293659E+00	4.901434018E+01
4	4.817285434E+00	4.475855758E-02	55	1.743446796E+00	5.299392612E+00	1.030635200E+02
2	4.693830720E+00	4.579463176E-02	56	1.788291650E+00	5.718933494E+00	5.421120435E+01
4	4.562171326E+00	4.682576392E-02	57	1.836078459E+00	6.189758519E+00	1.141143160E+02
2	4.421762780E+00	4.784046267E-02	58	1.887079915E+00	6.720024814E+00	6.007168940E+01
4	4.272050924E+00	4.882440901E-02	59	1.941604026E+00	7.319509720E+00	1.265067560E+02
2	4.112483753E+00	4.975989847E-02	60	2.000000000E+00	8.000000000E+00	6.659589842E+01

Таблица 1.27 –Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна
 R_w [N], Исследование 1 ($U = 2.962$ м/с, $F_n = 0.362$) – продолжение.

4	3.942528336E+00	5.062520239E-02	61	2.062665340E+00	8.775791828E+00	1.401723368E+02
2	3.761694416E+00	5.139385203E-02	62	2.130054468E+00	9.664338369E+00	7.370195051E+01
4	3.569566688E+00	5.203386147E-02	63	2.202689265E+00	1.068709587E+01	1.548175691E+02
2	3.365848179E+00	5.250692480E-02	64	2.281172033E+00	1.187063948E+01	8.115612211E+01
4	3.150417563E+00	5.276765485E-02	65	2.366201583E+00	1.324814955E+01	1.697451071E+02
2	2.923403491E+00	5.276298011E-02	66	2.458593336E+00	1.486141289E+01	8.846007749E+01
4	2.685278955E+00	5.243189007E-02	67	2.559304665E+00	1.676354888E+01	1.835749983E+02
2	2.436977899E+00	5.170582698E-02	68	2.669467163E+00	1.902276964E+01	9.468331443E+01
4	2.180034154E+00	5.051017055E-02	69	2.790428110E+00	2.172763788E+01	1.938578374E+02
2	1.916738474E+00	4.876745532E-02	70	2.923804400E+00	2.499452836E+01	9.825378735E+01
4	1.650301482E+00	4.640318436E-02	71	3.071553487E+00	2.897838960E+01	1.966710755E+02
2	1.384997410E+00	4.335530351E-02	72	3.236067977E+00	3.388854382E+01	9.680958702E+01
4	1.126243993E+00	3.958844295E-02	73	3.420303620E+00	4.001234272E+01	1.865907480E+02
2	8.805482806E-01	3.511363200E-02	74	3.627955279E+00	4.775136325E+01	8.744820920E+01
4	6.552209467E-01	3.001283338E-02	75	3.863703305E+00	5.767814816E+01	1.580920620E+02
2	4.577475605E-01	2.446455816E-02	76	4.133565494E+00	7.062760340E+01	6.811497255E+01
4	2.947342240E-01	1.876127653E-02	77	4.445411483E+00	8.784881363E+01	1.101608312E+02
2	1.704651090E-01	1.330174516E-02	78	4.809734345E+00	1.112662033E+02	4.089408032E+01
4	8.536673584E-02	8.535992220E-03	79	5.240843064E+00	1.439472807E+02	5.406816943E+01
2	3.504237673E-02	4.849366964E-03	80	5.758770483E+00	1.909806249E+02	1.523710028E+01
4	1.078540612E-02	2.412067503E-03	81	6.392453221E+00	2.612177449E+02	1.378965720E+01
2	2.076996224E-03	1.088392849E-03	82	7.185296534E+00	3.709659836E+02	2.348503342E+00
4	1.253417126E-04	5.189333649E-04	83	8.205509048E+00	5.524800320E+02	1.423796462E+00
2	2.824844425E-05	3.483458507E-04	84	9.566772234E+00	8.755809481E+02	6.594775796E-01
4	1.465473177E-04	3.932666806E-04	85	1.147371325E+01	1.510469551E+03	3.261490432E+00
2	2.718959653E-04	6.527412654E-04	86	1.433558703E+01	2.946092948E+03	5.448134450E+00
4	6.083340131E-04	1.408686754E-03	87	1.910732261E+01	6.975888156E+03	5.628204511E+01
1	2.416674990E-03	4.438448096E-03	88	2.865370835E+01	2.352569749E+04	1.612715520E+02
					$\sum R_{w1}$	4.877015988E+03
1	2.416674990E-03	4.438448096E-03	88.00000000000000	2.865370835E+01	2.352569749E+04	1.612715520E+02
4	1.910085271E-02	1.066004221E-02	88.89991695000000	5.208634016E+01	1.413095549E+05	1.682199526E+04
1	3.901655510E-02	7.450240006E-02	89.79983390000000	2.862417565E+02	2.345303031E+07	2.662363496E+06
					$\sum R_{w2}$	2.679346763E+06
1	3.382391E-23	3.26603E-25	89.8726910532665	4.500534183E+02	9.115745548E+07	3.113073922E-15
$R_w [N] = (4\rho g^2/\pi U^2) \int (I^2 + J^2) \sec^3\theta d\theta = (4\rho g^2/\pi U^2)(d\theta/3)\sum f(MC.\sec^3\theta)$						6.983
Экспериментальный R_w [N]						7.180

Таблица 1.28 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна
 R_w [N], Исследование 2 ($U = 3.849$ м/с, $F_n = 0.470$)

MC	I^2	θ	$\sec^3\theta$	fR_w
1	7.136160645E+00	0	1.000000000E+00	7.136160645E+00
4	7.135961180E+00	1	1.000457054E+00	2.855689079E+01
2	7.135362326E+00	2	1.001829748E+00	1.429683648E+01
4	7.134362704E+00	3	1.004122691E+00	2.865510189E+01
2	7.132960008E+00	4	1.007343597E+00	1.437068319E+01
4	7.131150995E+00	5	1.011503342E+00	2.885273225E+01
2	7.128931468E+00	6	1.016616029E+00	1.449477200E+01
4	7.126296256E+00	7	1.022699092E+00	2.915222685E+01
2	7.123239191E+00	8	1.029773410E+00	1.467064463E+01
4	7.119753074E+00	9	1.037863452E+00	2.955732602E+01
2	7.115829645E+00	10	1.046997448E+00	1.490051096E+01
4	7.111459536E+00	11	1.057207586E+00	3.007315587E+01
2	7.106632230E+00	12	1.068530241E+00	1.518730290E+01
4	7.101336004E+00	13	1.081006242E+00	3.070635418E+01
2	7.095557870E+00	14	1.094681162E+00	1.553474707E+01
4	7.089283508E+00	15	1.109605666E+00	3.146523659E+01
2	7.082497194E+00	16	1.125835889E+00	1.594745905E+01
4	7.075181712E+00	17	1.143433872E+00	3.236000967E+01
2	7.067318262E+00	18	1.162468045E+00	1.643106328E+01
4	7.058886362E+00	19	1.183013781E+00	3.340303938E+01
2	7.049863729E+00	20	1.205154011E+00	1.699234311E+01
4	7.040226155E+00	21	1.228979919E+00	3.460918629E+01
2	7.029947368E+00	22	1.254591725E+00	1.763942759E+01
4	7.018998880E+00	23	1.282099562E+00	3.599622156E+01
2	7.007349813E+00	24	1.311624476E+00	1.838202305E+01
4	1.072931997E-02	25	1.343299538E+00	5.765076227E-02
2	6.981813348E+00	26	1.377271115E+00	1.923169970E+01
4	6.967850466E+00	27	1.413700292E+00	3.940180896E+01
2	6.953035553E+00	28	1.452764502E+00	2.020224646E+01
4	6.937322546E+00	29	1.494659352E+00	4.147573608E+01
2	6.920661523E+00	30	1.539600718E+00	2.131011090E+01
4	6.902998357E+00	31	1.587827117E+00	4.384307191E+01
2	6.884274334E+00	32	1.639602416E+00	2.257494565E+01
4	6.864425725E+00	33	1.695218929E+00	4.654681771E+01
2	6.843383319E+00	34	1.755000964E+00	2.402028865E+01
4	6.821071889E+00	35	1.819308890E+00	4.963854691E+01
2	6.797409615E+00	36	1.888543820E+00	2.567441184E+01
4	6.772307426E+00	37	1.963153011E+00	5.318030286E+01
2	6.745668274E+00	38	2.043636109E+00	2.757138252E+01
4	6.717386321E+00	39	2.130552383E+00	5.724697375E+01
2	6.687346034E+00	40	2.224529146E+00	2.975239233E+01

Таблица 1.28 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 2 ($U = 3.849$ м/с, $F_n = 0.470$) – продолжение.

4	6.655421166E+00	41	2.326271560E+00	6.192926792E+01
2	6.621473622E+00	42	2.436574112E+00	3.226742242E+01
4	3.803218313E+00	43	2.556334072E+00	3.888918622E+01
2	6.546891094E+00	44	2.686567334E+00	3.517732751E+01
4	6.505908440E+00	45	2.828427125E+00	7.360595161E+01
2	6.462204382E+00	46	2.983226171E+00	3.855643447E+01
4	6.415559132E+00	47	3.152463079E+00	8.089925319E+01
2	6.365730709E+00	48	3.337853831E+00	4.249575727E+01
4	6.312452418E+00	49	3.541369556E+00	8.941890727E+01
2	6.255430030E+00	50	3.765282014E+00	4.710691636E+01
4	1.072931997E-02	51	4.012218614E+00	1.721935092E-01
2	6.128819173E+00	52	4.285229282E+00	5.252679077E+01
4	6.058474490E+00	53	4.587868120E+00	1.111819279E+02
2	5.982865129E+00	54	4.924293659E+00	5.892276964E+01
4	5.901504617E+00	55	5.299392612E+00	1.250975599E+02
2	5.813854410E+00	56	5.718933494E+00	6.649809343E+01
4	5.719318495E+00	57	6.189758519E+00	1.416048015E+02
2	5.617237755E+00	58	6.720024814E+00	7.549595419E+01
4	5.506884276E+00	59	7.319509720E+00	1.612307719E+02
2	5.387455906E+00	60	8.000000000E+00	8.619929450E+01
4	5.258071518E+00	61	8.775791828E+00	1.845749642E+02
2	5.117767709E+00	62	9.664338369E+00	9.891967768E+01
4	4.965498037E+00	63	1.068709587E+01	2.122670143E+02
2	4.800136408E+00	64	1.187063948E+01	1.139613775E+02
4	4.620487015E+00	65	1.324814955E+01	2.448516118E+02
2	4.425304276E+00	66	1.486141289E+01	1.315325480E+02
4	4.213327728E+00	67	1.676354888E+01	2.825213012E+02
2	3.983338832E+00	68	1.902276964E+01	1.515482740E+02
4	3.734249283E+00	69	2.172763788E+01	3.245456647E+02
2	3.465233643E+00	70	2.499452836E+01	1.732237611E+02
4	3.175922656E+00	71	2.897838960E+01	3.681324963E+02
2	2.866676500E+00	72	3.388854382E+01	1.942949844E+02
4	2.538957265E+00	73	4.001234272E+01	4.063585129E+02
2	2.195812449E+00	74	4.775136325E+01	2.097060757E+02
4	1.842457286E+00	75	5.767814816E+01	4.250780973E+02
2	1.486888630E+00	76	7.062760340E+01	2.100307609E+02
4	1.140356748E+00	77	8.784881363E+01	4.007159497E+02
2	8.173483889E-01	78	1.112662033E+02	1.818865041E+02
4	5.345193018E-01	79	1.439472807E+02	3.077704000E+02
2	3.079034453E-01	80	1.909806249E+02	1.176071848E+02
4	1.481072841E-01	81	2.612177449E+02	1.547530030E+02
2	5.467258923E-02	82	3.709659836E+02	4.056334167E+01

Таблица 1.28 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 2 ($U = 3.849$ м/с, $F_n = 0.470$) – продолжение.

4	1.340551179E-02	83	5.524800320E+02	2.962511033E+01
2	1.597478953E-03	84	8.755809481E+02	2.797444272E+00
4	1.201565356E-05	85	1.510469551E+03	7.259711538E-02
2	7.437453743E-05	86	2.946092948E+03	4.382286005E-01
4	1.604382530E-04	87	6.975888156E+03	4.476797235E+00
1	4.278579860E-04	88	2.352569749E+04	1.006565755E+01
			$\sum R_{w1}$	7.492695764E+03
1	4.278579860E-04	88.00000000000000	2.352569749E+04	1.006565755E+01
4	3.984038158E-03	88.96582942500000	1.700834719E+05	2.710476168E+03
1	2.322757482E-02	89.93165885000000	5.892795346E+08	1.368753448E+07
			$\sum R_{w2}$	1.369025502E+07
R_w [N] = $2(\pi \rho U^2/2) \int A(\theta) ^2 \cos^3 \theta d\theta = 2(\pi \rho U^2/2) (d\theta/3) \Sigma f[MC(A(\theta)^2 \cos^3 \theta)]$				21.760
Экспериментальный R_w [N]				22.396

Таблица 1.29 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 3 ($U = 1.261$ м/с, $F_n = 0.3$)

MC	I^2	θ	$\sec^3 \theta$	fR_w
1	1.184443036E-06	0	1.000000000E+00	1.184443036E-06
4	1.184271681E-06	1	1.000457054E+00	4.739251829E-06
2	1.183757383E-06	2	1.001829748E+00	2.371846720E-06
4	1.182899438E-06	3	1.004122691E+00	4.751104665E-06
2	1.181696676E-06	4	1.007343597E+00	2.380749161E-06
4	1.180147455E-06	5	1.011503342E+00	4.774892377E-06
2	1.178249660E-06	6	1.016616029E+00	2.395654981E-06
4	1.176000701E-06	7	1.022699092E+00	4.810779400E-06
2	1.173397512E-06	8	1.029773410E+00	2.416667115E-06
4	1.170436541E-06	9	1.037863452E+00	4.859013235E-06
2	1.167113752E-06	10	1.046997448E+00	2.443930240E-06
4	1.163424621E-06	11	1.057207586E+00	4.919925337E-06
2	1.159364125E-06	12	1.068530241E+00	2.477631256E-06
4	1.154926745E-06	13	1.081006242E+00	4.993932079E-06
2	1.150106456E-06	14	1.094681162E+00	2.517999743E-06
4	1.144896725E-06	15	1.109605666E+00	5.081535570E-06
2	1.139290504E-06	16	1.125835889E+00	2.565308274E-06
4	1.133280228E-06	17	1.143433872E+00	5.183323996E-06
2	1.126857813E-06	18	1.162468045E+00	2.619872398E-06
4	1.120014649E-06	19	1.183013781E+00	5.299971059E-06
2	1.112741601E-06	20	1.205154011E+00	2.682050009E-06
4	1.105029012E-06	21	1.228979919E+00	5.432233866E-06

Таблица 1.29 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 3 ($U = 1.261$ м/с, $F_n = 0.3$) – продолжение.

2	1.096866700E-06	22	1.254591725E+00	2.752239769E-06
4	1.088243964E-06	23	1.282099562E+00	5.580948440E-06
2	3.787634987E-09	24	1.311624476E+00	9.935909510E-09
4	1.069571884E-06	25	1.343299538E+00	5.747021670E-06
2	1.059498633E-06	26	1.377271115E+00	2.918433727E-06
4	1.048917185E-06	27	1.413700292E+00	5.931418122E-06
2	1.037814440E-06	28	1.452764502E+00	3.015399956E-06
4	1.026176896E-06	29	1.494659352E+00	6.135139576E-06
2	1.013990685E-06	30	1.539600718E+00	3.122281572E-06
4	1.001241627E-06	31	1.587827117E+00	6.359194421E-06
2	9.879152919E-07	32	1.639602416E+00	3.239576598E-06
4	9.739970748E-07	33	1.695218929E+00	6.604553113E-06
2	9.594722865E-07	34	1.755000964E+00	3.367749576E-06
4	9.443262619E-07	35	1.819308890E+00	6.872084654E-06
2	9.285444878E-07	36	1.888543820E+00	3.507193908E-06
4	9.121127547E-07	37	1.963153011E+00	7.162467604E-06
2	8.950173336E-07	38	2.043636109E+00	3.658179482E-06
4	8.772451832E-07	39	2.130552383E+00	7.476067264E-06
2	8.587841908E-07	40	2.224529146E+00	3.820780926E-06
4	8.396234511E-07	41	2.326271560E+00	7.812768621E-06
2	8.197535867E-07	42	2.436574112E+00	3.994780735E-06
4	7.991671171E-07	43	2.556334072E+00	8.171752521E-06
2	7.778588782E-07	44	2.686567334E+00	4.179540505E-06
4	7.558264998E-07	45	2.828427125E+00	8.551200694E-06
2	7.330709441E-07	46	2.983226171E+00	4.373832851E-06
4	7.095971098E-07	47	3.152463079E+00	8.947914759E-06
2	6.854145054E-07	48	3.337853831E+00	4.575626865E-06
4	6.605379924E-07	49	3.541369556E+00	9.356836548E-06
2	6.349885995E-07	50	3.765282014E+00	4.781822306E-06
4	6.087944029E-07	51	4.012218614E+00	9.770464941E-06
2	5.819914655E-07	52	4.285229282E+00	4.987933740E-06
4	5.546248233E-07	53	4.587868120E+00	1.017818218E-05
2	5.267494963E-07	54	4.924293659E+00	5.187738410E-06
4	4.984314966E-07	55	5.299392612E+00	1.056553676E-05
2	4.697487930E-07	56	5.718933494E+00	5.372924213E-06
4	4.407921788E-07	57	6.189758519E+00	1.091358857E-05
2	4.116659729E-07	58	6.720024814E+00	5.532811106E-06
4	3.824884719E-07	59	7.319509720E+00	1.119851235E-05
2	3.533920469E-07	60	8.000000000E+00	5.654272750E-06
4	3.245227709E-07	61	8.775791828E+00	1.139177712E-05
2	2.960394429E-07	62	9.664338369E+00	5.722050693E-06

Таблица 1.29 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 3 ($U = 1.261$ м/с, $F_n = 0.3$) – продолжение.

4	2.681118762E-07	63	1.068709587E+01	1.146134930E-05
2	2.409183259E-07	64	1.187063948E+01	5.719709183E-06
4	2.146419554E-07	65	1.324814955E+01	1.137443490E-05
2	1.894663007E-07	66	1.486141289E+01	5.631473847E-06
4	1.655697714E-07	67	1.676354888E+01	1.110214782E-05
2	1.431193481E-07	68	1.902276964E+01	5.445052779E-06
4	1.222637835E-07	69	2.172763788E+01	1.062601285E-05
2	1.031267743E-07	70	2.499452836E+01	5.155210169E-06
4	8.580071870E-08	71	2.897838960E+01	9.945466619E-06
2	7.034175773E-08	72	3.388854382E+01	4.767559478E-06
4	5.676677059E-08	73	4.001234272E+01	9.085485920E-06
2	4.505279830E-08	74	4.775136325E+01	4.302665075E-06
4	2.118253446E-09	75	5.767814816E+01	4.887077443E-07
2	2.693061945E-08	76	7.062760340E+01	3.804090219E-06
4	2.030418193E-08	77	8.784881363E+01	7.134793177E-06
2	1.511206562E-08	78	1.112662033E+02	3.362924332E-06
4	1.118530470E-08	79	1.439472807E+02	6.440376784E-06
2	8.333180800E-09	80	1.909806249E+02	3.182952153E-06
4	6.338874029E-09	81	2.612177449E+02	6.623305517E-06
2	4.950781694E-09	82	3.709659836E+02	3.673143201E-06
4	3.875772837E-09	83	5.524800320E+02	8.565148404E-06
2	2.807598027E-09	84	8.755809481E+02	4.916558685E-06
4	1.546262804E-09	85	1.510469551E+03	9.342331535E-06
2	2.755406765E-10	86	2.946092948E+03	1.623536888E-06
4	5.370269203E-10	87	6.975888156E+03	1.498495893E-05
1	6.572944677E-09	88	2.352569749E+04	1.546331081E-04
			$\sum fR_{w1}$	6.527971555E-04
1	6.572944677E-09	88.00000000000000	2.352569749E+04	1.546331081E-04
4	1.070638894E-09	88.8765275680591	1.326673725E+05	5.681553960E-04
1	2.118253446E-09	89.7530551361182	1.249027319E+07	2.645756422E-02
			$\sum fR_{w2}$	2.718035272E-02
1	6.572944677E-09	88.00000000000000	2.352569749E+04	1.546331081E-04
4	7.303883462E-09	88.1168703424079	2.818135070E+04	8.233332054E-04
2	7.641558267E-09	88.2337406848158	3.415158499E+04	5.219426532E-04
4	7.335632031E-09	88.3506110272236	4.193518792E+04	1.230484431E-03
2	6.154313090E-09	88.4674813696315	5.227643533E+04	6.434511005E-04
4	4.059720343E-09	88.5843517120394	6.631844857E+04	1.076937419E-03
2	1.543216864E-09	88.7012220544473	8.587658412E+04	2.650523857E-04
4	1.627653809E-11	88.8180923968552	1.139487906E+05	7.418767320E-06

Таблица 1.29 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна
 R_w [N], Исследование 3 ($U = 1.261$ м/с, $F_n = 0.3$) – продолжение

2	1.542167288E-09	88.9349627392631	1.557214800E+05	4.802971450E-04
4	6.096328129E-09	89.0518330816709	2.206850783E+05	5.381474602E-03
1	6.741269853E-09	89.1687034240788	3.274504817E+05	2.207432060E-03
			ΣfR_{w3}	1.279245688E-02
1	89.1687034240788	3.274504817E+05	6.741269853E-09	2.207432060E-03
4	89.1979210096808	3.645516180E+05	5.260302877E-09	7.670607700E-03
2	89.2271385952828	4.074764821E+05	3.311181145E-09	2.698456889E-03
4	89.2563561808847	4.574141120E+05	1.375119398E-09	2.515996074E-03
2	89.2855737664867	5.158571793E+05	1.379044107E-10	1.422779606E-04
4	89.3147913520887	5.846964373E+05	2.853499484E-10	6.673723928E-04
2	89.3440089376906	6.663502962E+05	2.108239322E-09	2.809651793E-03
4	89.3732265232926	7.639449293E+05	7.620385283E-09	2.328621879E-02
2	89.4024441088946	8.815682075E+05	7.355297524E-09	1.296839291E-02
4	89.4316616944965	1.024633330E+06	7.066342120E-09	2.896163864E-02
2	89.4608792800985	1.200408475E+06	3.676177384E-09	8.825828977E-03
4	89.4900968657005	1.418802846E+06	2.453456020E-10	1.392388153E-03
2	89.5193144513024	1.693557646E+06	1.613301533E-09	5.464438292E-03
4	89.5485320369044	2.044092605E+06	6.741266631E-09	5.511909307E-02
2	89.5777496225064	2.498443608E+06	5.924509101E-09	2.960410378E-02
4	89.6069672081084	3.098073780E+06	8.483372813E-11	1.051284595E-03
2	89.6361847937103	3.906016836E+06	5.560966934E-09	4.344246094E-02
4	89.6654023793123	5.021191183E+06	3.906988331E-09	7.847094144E-02
2	89.6946199649143	6.604685524E+06	3.787634986E-09	5.003227593E-02
4	89.7238375505162	8.930567628E+06	1.446160728E-09	5.166014474E-02
2	89.7530551361182	1.249027319E+07	6.785011725E-09	1.694933001E-01
4	89.7822727217202	1.822352983E+07	7.351423841E-09	5.358755665E-01
2	89.8114903073221	2.807819537E+07	2.342224576E-09	1.315308785E-01
4	89.8407078929241	4.653575930E+07	7.620385283E-09	1.418481661E+00
1	89.8699254785261	8.546578891E+07	6.107320828E-33	5.219669927E-25
			ΣfR_{w4}	2.664372412E+00
R_w [N] = $(0.5\pi\rho U^2) \int A(\theta) ^2 \cos^3\theta d\theta = (\pi\rho U^2)(2*g/(\pi*U^2))^2(d\theta/3)\Sigma f(MC.I^2\sec^3\theta)$				0.322
Экспериментальный R_w [N]				0.332

Таблица 1.30 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна
 R_w [N], Исследование 4 ($U = 1.681$ м/с, $F_n = 0.4$)

MC	J^2	θ	$\text{Sec}^3\theta$	fR_w
1	4.220122751E-09	0	1.000000000E+00	4.220122751E-09
4	4.221053388E-09	1	1.000457054E+00	1.689193055E-08
2	4.223846491E-09	2	1.001829748E+00	8.463150130E-09
4	4.228505630E-09	3	1.004122691E+00	1.698375380E-08
2	4.235036758E-09	4	1.007343597E+00	8.532274326E-09
4	4.243448210E-09	5	1.011503342E+00	1.716904818E-08
2	4.253750707E-09	6	1.016616029E+00	8.648862306E-09
4	4.265957356E-09	7	1.022699092E+00	1.745116286E-08
2	4.280083654E-09	8	1.029773410E+00	8.815032682E-09
4	4.296147487E-09	9	1.037863452E+00	1.783525785E-08
2	4.314169128E-09	10	1.046997448E+00	9.033848134E-09
4	4.334171235E-09	11	1.057207586E+00	1.832847483E-08
2	4.356178846E-09	12	1.068530241E+00	9.309417669E-09
4	4.380219367E-09	13	1.081006242E+00	1.894017790E-08
2	4.406322552E-09	14	1.094681162E+00	9.647036582E-09
4	4.434520487E-09	15	1.109605666E+00	1.968227623E-08
2	4.464847550E-09	16	1.125835889E+00	1.005337122E-08
4	4.497340372E-09	17	1.143433872E+00	2.056964526E-08
2	4.532037779E-09	18	1.162468045E+00	1.053669819E-08
4	4.568980716E-09	19	1.183013781E+00	2.162066861E-08
2	4.608212157E-09	20	1.205154011E+00	1.110721073E-08
4	4.649776984E-09	21	1.228979919E+00	2.285793017E-08
2	4.693721847E-09	22	1.254591725E+00	1.177740917E-08
4	4.740094980E-09	23	1.282099562E+00	2.430909480E-08
2	4.788945986E-09	24	1.311624476E+00	1.256259754E-08
4	4.840325570E-09	25	1.343299538E+00	2.600802842E-08
2	4.894285219E-09	26	1.377271115E+00	1.348151532E-08
4	4.950876815E-09	27	1.413700292E+00	2.799622400E-08
2	5.010152178E-09	28	1.452764502E+00	1.455714246E-08
4	5.072162511E-09	29	1.494659352E+00	3.032462052E-08
2	5.136957747E-09	30	1.539600718E+00	1.581772767E-08
4	5.204585772E-09	31	1.587827117E+00	3.305592968E-08
2	5.275091509E-09	32	1.639602416E+00	1.729810556E-08
4	5.348515829E-09	33	1.695218929E+00	3.626762110E-08
2	5.424894278E-09	34	1.755000964E+00	1.904138938E-08
4	5.504255577E-09	35	1.819308890E+00	4.005576442E-08
2	5.586619857E-09	36	1.888543820E+00	2.110115281E-08
4	5.671996601E-09	37	1.963153011E+00	4.453998883E-08
2	5.760382230E-09	38	2.043636109E+00	2.354425025E-08
4	5.851757288E-09	39	2.130552383E+00	4.986990175E-08
2	5.946083161E-09	40	2.224529146E+00	2.645447060E-08
4	6.043298261E-09	41	2.326271560E+00	5.623341149E-08

Таблица 1.30 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 4 ($U = 1.681$ м/с, $F_n = 0.4$) – продолжение.

2	6.143313591E-09	42	2.436574112E+00	2.993727771E-08
4	6.246007610E-09	43	2.556334072E+00	6.386752826E-08
2	6.351220290E-09	44	2.686567334E+00	3.412596193E-08
4	6.458746266E-09	45	2.828427125E+00	7.307237252E-08
2	6.568326947E-09	46	2.983226171E+00	3.918960970E-08
4	6.679641488E-09	47	3.152463079E+00	8.422929269E-08
2	6.792296456E-09	48	3.337853831E+00	4.534338550E-08
4	6.905814107E-09	49	3.541369556E+00	9.782415936E-08
2	7.019619114E-09	50	3.765282014E+00	5.286169119E-08
4	7.133023672E-09	51	4.012218614E+00	1.144770014E-07
2	7.245210912E-09	52	4.285229282E+00	6.209477990E-08
4	7.355216619E-09	53	4.587868120E+00	1.349790553E-07
2	7.461909361E-09	54	4.924293659E+00	7.348926591E-08
4	7.563969255E-09	55	5.299392612E+00	1.603377711E-07
2	7.659865808E-09	56	5.718933494E+00	8.761252626E-08
4	7.747835566E-09	57	6.189758519E+00	1.918289248E-07
2	7.825860650E-09	58	6.720024814E+00	1.051799555E-07
4	7.891649811E-09	59	7.319509720E+00	2.310520300E-07
2	7.942624268E-09	60	8.000000000E+00	1.270819883E-07
4	7.975911441E-09	61	8.775791828E+00	2.799797538E-07
2	7.988350703E-09	62	9.664338369E+00	1.544042484E-07
4	7.976516459E-09	63	1.068709587E+01	3.409831845E-07
2	7.936765107E-09	64	1.187063948E+01	1.884289545E-07
4	7.865313660E-09	65	1.324814955E+01	4.168034064E-07
2	7.758358646E-09	66	1.486141289E+01	2.306003424E-07
4	7.612243928E-09	67	1.676354888E+01	5.104328926E-07
2	7.423684638E-09	68	1.902276964E+01	2.824380855E-07
4	7.190050488E-09	69	2.172763788E+01	6.248912533E-07
2	6.909704351E-09	70	2.499452836E+01	3.454096027E-07
4	6.582380279E-09	71	2.897838960E+01	7.629871209E-07
2	6.209569081E-09	72	3.388854382E+01	4.208665078E-07
4	5.794861390E-09	73	4.001234272E+01	9.274639199E-07
2	5.344183538E-09	74	4.775136325E+01	5.103840988E-07
4	4.865861894E-09	75	5.767814816E+01	1.122615613E-06
2	4.370483152E-09	76	7.062760340E+01	6.173535015E-07
4	3.870599928E-09	77	8.784881363E+01	1.360110447E-06
2	3.380473619E-09	78	1.112662033E+02	7.522649302E-07
4	2.916238408E-09	79	1.439472807E+02	1.679138355E-06
2	2.497070951E-09	80	1.909806249E+02	9.537843413E-07

Таблица 1.30 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 4 ($U = 1.681$ м/с, $F_n = 0.4$) – продолжение.

4	2.148110075E-09	81	2.612177449E+02	2.244497879E-06
2	1.906008682E-09	82	3.709659836E+02	1.414128771E-06
4	1.828220321E-09	83	5.524800320E+02	4.040220886E-06
2	2.005962240E-09	84	8.755809481E+02	3.512764640E-06
4	2.570411684E-09	85	1.510469551E+03	1.553011433E-05
2	3.682315508E-09	86	2.946092948E+03	2.169688750E-05
4	5.556754711E-09	87	6.975888156E+03	1.550531975E-04
1	7.581543517E-09	88	2.352569749E+04	1.783610993E-04
			$\sum R_{w1}$	3.969938297E-04
1	7.581543517E-09	88.00000000000000	2.352569749E+04	1.783610993E-04
4	3.294889651E-10	88.94957400000000	1.623097077E+05	2.139170305E-04
1	4.527404649E-09	89.89914800000000	1.833644012E+08	8.301648425E-01
			$\sum R_{w2}$	8.305571207E-01
R_w [N] = $(4\rho g^2/\pi U^2) \int (I^2 + J^2) \sec^3\theta d\theta = (4\rho g^2/\pi U^2)(d\theta/3) \sum f(MC.\sec^3\theta)$				1.743
Экспериментальный R_w [N]				1.818

Таблица 1.31 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 7а ($U = 2.023$ м/с, $F_n = 0.37$)

MC	J^2	θ	$\sec^3\theta$	fR_w
1	1.355650712E-07	0	1.000000000E+00	1.355650712E-07
4	1.355980897E-07	1	1.000457054E+00	5.426402612E-07
2	1.356971985E-07	2	1.001829748E+00	2.718909803E-07
4	1.358625581E-07	3	1.004122691E+00	5.456907096E-07
2	1.360944362E-07	4	1.007343597E+00	2.741877180E-07
4	1.363932086E-07	5	1.011503342E+00	5.518487452E-07
2	1.367593595E-07	6	1.016616029E+00	2.780635141E-07
4	1.371934832E-07	7	1.022699092E+00	5.612306028E-07
2	1.376962845E-07	8	1.029773410E+00	2.835919450E-07
4	1.382685811E-07	9	1.037863452E+00	5.740156276E-07
2	1.389113044E-07	10	1.046997448E+00	2.908795624E-07
4	1.396255018E-07	11	1.057207586E+00	5.904525587E-07
2	1.404123388E-07	12	1.068530241E+00	3.000696605E-07
4	1.412731007E-07	13	1.081006242E+00	6.108684147E-07
2	1.422091956E-07	14	1.094681162E+00	3.113474549E-07
4	1.432221561E-07	15	1.109605666E+00	6.356804636E-07
2	1.443136425E-07	16	1.125835889E+00	3.249469562E-07
4	1.454854451E-07	17	1.143433872E+00	6.654119432E-07
2	1.467394867E-07	18	1.162468045E+00	3.411599285E-07
4	1.480778253E-07	19	1.183013781E+00	7.007124319E-07

Таблица 1.31 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 7а ($U = 2.023$ м/с, $F_n = 0.37$) – продолжение.

2	1.495026563E-07	20	1.205154011E+00	3.603474520E-07
4	1.510163151E-07	21	1.228979919E+00	7.423840752E-07
2	1.526212787E-07	22	1.254591725E+00	3.829547865E-07
4	1.543201671E-07	23	1.282099562E+00	7.914152745E-07
2	1.561157445E-07	24	1.311624476E+00	4.095304631E-07
4	1.580109193E-07	25	1.343299538E+00	8.490239800E-07
2	1.600087434E-07	26	1.377271115E+00	4.407508409E-07
4	1.621124102E-07	27	1.413700292E+00	9.167134466E-07
2	1.643252507E-07	28	1.452764502E+00	4.774517819E-07
4	1.666507288E-07	29	1.494659352E+00	9.963442808E-07
2	1.690924329E-07	30	1.539600718E+00	5.206696620E-07
4	1.716540658E-07	31	1.587827117E+00	1.090227921E-06
2	1.743394304E-07	32	1.639602416E+00	5.716947024E-07
4	1.771524116E-07	33	1.695218929E+00	1.201248486E-06
2	1.800969526E-07	34	1.755000964E+00	6.321406510E-07
4	1.831770258E-07	35	1.819308890E+00	1.333022366E-06
2	1.863965951E-07	36	1.888543820E+00	7.040362755E-07
4	1.897595704E-07	37	1.963153011E+00	1.490108288E-06
2	1.932697503E-07	38	2.043636109E+00	7.899460808E-07
4	1.969307522E-07	39	2.130552383E+00	1.678285134E-06
2	2.007459268E-07	40	2.224529146E+00	8.931303305E-07
4	2.047182541E-07	41	2.326271560E+00	1.904921009E-06
2	2.088502162E-07	42	2.436574112E+00	1.017758060E-06
4	2.131436447E-07	43	2.556334072E+00	2.179465444E-06
2	2.175995353E-07	44	2.686567334E+00	1.169191607E-06
4	2.222178253E-07	45	2.828427125E+00	2.514107699E-06
2	2.269971256E-07	46	2.983226171E+00	1.354367532E-06
4	2.319344002E-07	47	3.152463079E+00	2.924658534E-06
2	2.370245829E-07	48	3.337853831E+00	1.582306824E-06
4	2.422601200E-07	49	3.541369556E+00	3.431730454E-06
2	2.476304275E-07	50	3.765282014E+00	1.864796789E-06
4	2.531212479E-07	51	4.012218614E+00	4.062311130E-06
2	2.587138918E-07	52	4.285229282E+00	2.217296690E-06
4	2.643843475E-07	53	4.587868120E+00	4.851842077E-06
2	2.701022424E-07	54	4.924293659E+00	2.660125519E-06
4	2.758296399E-07	55	5.299392612E+00	5.846918224E-06
2	2.815196598E-07	56	5.718933494E+00	3.219984423E-06
4	2.871149131E-07	57	6.189758519E+00	7.108687916E-06
2	2.925457561E-07	58	6.720024814E+00	3.931829480E-06
4	2.977283836E-07	59	7.319509720E+00	8.716903190E-06
2	3.025628070E-07	60	8.000000000E+00	4.841004911E-06

Таблица 1.31 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 7а ($U = 2.023$ м/с, $F_n = 0.37$) – продолжение.

4	3.069308048E-07	61	8.775791828E+00	1.077424339E-05
2	3.106939902E-07	62	9.664338369E+00	6.005303702E-06
4	3.136922199E-07	63	1.068709587E+01	1.340983531E-05
2	3.157426793E-07	64	1.187063948E+01	7.496135030E-06
4	3.166401210E-07	65	1.324814955E+01	1.677958270E-05
2	3.161589013E-07	66	1.486141289E+01	9.397135940E-06
4	3.140576519E-07	67	1.676354888E+01	2.105888319E-05
2	3.100875954E-07	68	1.902276964E+01	1.179744979E-05
4	3.040056004E-07	69	2.172763788E+01	2.642129440E-05
2	2.955929639E-07	70	2.499452836E+01	1.477641343E-05
4	2.846804054E-07	71	2.897838960E+01	3.299831880E-05
2	2.711786434E-07	72	3.388854382E+01	1.837969868E-05
4	2.551119416E-07	73	4.001234272E+01	4.083050577E-05
2	2.366491277E-07	74	4.775136325E+01	2.260063692E-05
4	2.161232100E-07	75	5.767814816E+01	4.986234611E-05
2	1.940282509E-07	76	7.062760340E+01	2.740750071E-05
4	1.709832130E-07	77	8.784881363E+01	6.008268964E-05
2	1.476605730E-07	78	1.112662033E+02	3.285926268E-05
4	1.246950278E-07	79	1.439472807E+02	7.179804068E-05
2	1.026129714E-07	80	1.909806249E+02	3.919417878E-05
4	8.184968241E-08	81	2.612177449E+02	8.552235785E-05
2	6.293681292E-08	82	3.709659836E+02	4.669483342E-05
4	4.690644495E-08	83	5.524800320E+02	1.036594968E-04
2	3.572968025E-08	84	8.755809481E+02	6.256845462E-05
4	3.222781123E-08	85	1.510469551E+03	1.947165103E-04
2	3.888764105E-08	86	2.946092948E+03	2.291332101E-04
4	5.420966124E-08	87	6.975888156E+03	1.512642135E-03
1	5.918069997E-08	88	2.352569749E+04	1.392267245E-03
			$\sum fR_{w1}$	4.254595587E-03
1	5.918069997E-08	88.00000000000000	2.352569749E+04	1.392267245E-03
4	1.086603495E-08	88.9924984850000	1.839492059E+05	7.995194002E-03
1	4.972833050E-08	89.9849969700000	5.569689427E+10	2.769713566E+03
			$\sum fR_{w2}$	2.769722954E+03
R_w [N] = $(4\rho g^2/\pi U^2) \int (I^2 + J^2) \sec^3\theta \, d\theta = (4\rho g^2/\pi U^2)(d\theta/3) \sum f(MC.\sec^3\theta)$				4.204
Экспериментальный R_w [N] (Сангсон Дзю)				4.290

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Схема расчета, диаграмма расчета и характерные результаты для двухкорпусных судов

Таблица 2.1 – Схема расчета теоретических значений волнового сопротивления $R_w [N]$, (двухкорпусных судно)

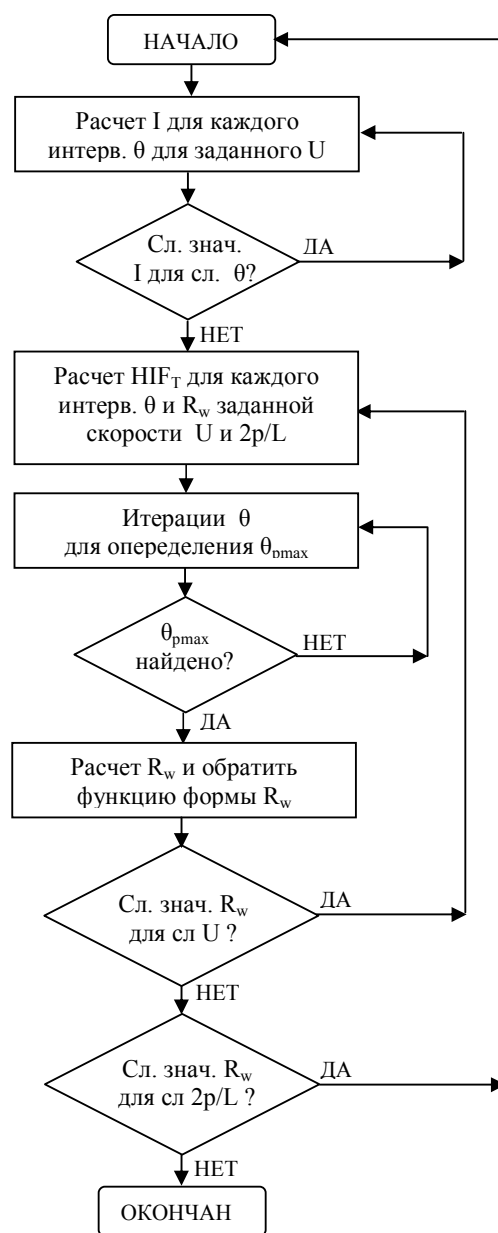


Рис. 2.1 – Блок-схема расчета
(Теоретический расчет для двухкорпусного судна)

Таблица 2.43 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 1, Катамаран, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.3$, $2p/L = 0.3$

MC	I^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	fR_w (θ)
1	1.501400361E-07	0	0.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00	4.000000000E+00	6.005601444E-07
4	6.262368735E-05	1	1.745240644E-02	9.96954135E-01	1.000457054E+00	3.99998969E+00	1.002436697E-03
2	2.043140467E-09	2	3.489949670E-02	9.987820251E-01	1.001829748E+00	3.99995869E+00	1.637501428E-08
4	1.182899438E-06	3	5.233595624E-02	9.972609477E-01	1.004122691E+00	3.999990681E+00	1.900437438E-05
2	1.181696676E-06	4	6.975647374E-02	9.951340344E-01	1.007343597E+00	3.999983373E+00	9.522957059E-06
4	1.396530966E-09	5	8.715574275E-02	9.924038765E-01	1.011503342E+00	3.999973901E+00	2.260138436E-08
2	1.178249660E-06	6	1.045284633E-01	9.890738004E-01	1.016616029E+00	3.999962206E+00	9.582529384E-06
4	1.176000701E-06	7	1.218693434E-01	9.851478631E-01	1.022699092E+00	3.999948216E+00	1.924286848E-05
2	1.173397512E-06	8	1.391731010E-01	9.806308480E-01	1.029773410E+00	3.999931844E+00	9.666503747E-06
4	1.170436541E-06	9	1.564344650E-01	9.755282581E-01	1.037863452E+00	3.999912986E+00	1.943563014E-05
2	1.167113752E-06	10	1.736481777E-01	9.698463104E-01	1.046997448E+00	3.999891523E+00	9.775455849E-06
4	1.163424621E-06	11	1.908089954E-01	9.635919273E-01	1.057207586E+00	3.999867317E+00	1.967904856E-05
2	1.159364125E-06	12	2.079116908E-01	9.567727288E-01	1.068530241E+00	3.999840213E+00	9.910129131E-06
4	1.154926745E-06	13	2.249510543E-01	9.493970231E-01	1.081006242E+00	3.999810031E+00	1.997477963E-05
2	1.150106456E-06	14	2.419218956E-01	9.414737964E-01	1.094681162E+00	3.999776574E+00	1.007143638E-05
4	1.144896725E-06	15	2.588190451E-01	9.330127019E-01	1.109605666E+00	3.999739615E+00	2.032481912E-05
2	1.139290504E-06	16	2.756373558E-01	9.240240481E-01	1.125835889E+00	3.999698903E+00	1.026046069E-05
4	1.133280228E-06	17	2.923717047E-01	9.145187863E-01	1.143433872E+00	3.999654155E+00	2.073150336E-05
2	1.126857813E-06	18	3.090169944E-01	9.045084972E-01	1.162468045E+00	3.999605058E+00	1.047845489E-05
4	1.120014649E-06	19	3.255681545E-01	8.940053768E-01	1.183013781E+00	3.999551259E+00	2.119750592E-05
2	1.112741601E-06	20	3.420201433E-01	8.83022216E-01	1.205154011E+00	3.999492367E+00	1.072683854E-05
4	1.105029012E-06	21	3.583679495E-01	8.715724127E-01	1.228979919E+00	3.999427944E+00	2.172582792E-05
2	1.096866700E-06	22	3.746065934E-01	8.596699002E-01	1.254591725E+00	3.999357501E+00	1.100719076E-05
4	1.088243964E-06	23	3.907311285E-01	8.473291852E-01	1.282099562E+00	3.999280495E+00	2.231977824E-05
2	1.079149596E-06	24	4.067366431E-01	8.345653032E-01	1.311624476E+00	3.999196317E+00	1.132123705E-05
4	1.069571884E-06	25	4.226182617E-01	8.213938048E-01	1.343299538E+00	3.999104286E+00	2.298293899E-05

Таблица 2.43 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 1, Катамаран, Корпус Виглея 1, МКК, усовersh. формула Ньюмена, $F_n = 0.3$, $2p/L = 0.3$ – продолжение.

2	1.059498633E-06	26	4.383711468E-01	8.078307377E-01	1.377271115E+00	3.999003642E+00	1.167082710E-05
4	1.048917185E-06	27	4.539004997E-01	7.938926261E-01	1.413700292E+00	3.998893534E+00	2.371910958E-05
2	1.037814440E-06	28	4.694715628E-01	7.795964517E-01	1.452764502E+00	3.998773005E+00	1.205789994E-05
4	1.026176896E-06	29	4.848096202E-01	7.649596321E-01	1.494659352E+00	3.998640985E+00	2.453222055E-05
2	1.013990685E-06	30	5.000000000E-01	7.500000000E-01	1.539600718E+00	3.998496265E+00	1.248443121E-05
4	1.001241627E-06	31	5.150380749E-01	7.347357814E-01	1.587827117E+00	3.998337490E+00	2.542620546E-05
2	9.879152919E-07	32	5.299197642E-01	7.191855734E-01	1.639602416E+00	3.998163127E+00	1.295235570E-05
4	9.739970748E-07	33	5.446390350E-01	7.033683215E-01	1.695218929E+00	3.997971446E+00	2.640481476E-05
2	9.594722865E-07	34	5.591929035E-01	6.873032967E-01	1.755000964E+00	3.997760487E+00	1.346345619E-05
4	9.443262619E-07	35	5.735764364E-01	6.710100717E-01	1.819308890E+00	3.997528030E+00	2.747135103E-05
2	9.285444878E-07	36	5.877852523E-01	6.545084972E-01	1.888543820E+00	3.997271549E+00	1.401920643E-05
4	9.121127547E-07	37	6.018150232E-01	6.378186779E-01	1.963153011E+00	3.996988168E+00	2.862829827E-05
2	8.950173336E-07	38	6.156614753E-01	6.209609478E-01	2.043636109E+00	3.996674606E+00	1.4620555304E-05
4	8.772451832E-07	39	6.293203910E-01	6.039558454E-01	2.130552383E+00	3.996327106E+00	2.987681025E-05
2	8.587841908E-07	40	6.427876097E-01	5.868240888E-01	2.224529146E+00	3.995941362E+00	1.526761654E-05
4	8.396234511E-07	41	6.560590290E-01	5.695865505E-01	2.326271560E+00	3.995512421E+00	3.121601407E-05
2	8.197535867E-07	42	6.691306064E-01	5.522642316E-01	2.436574112E+00	3.995034576E+00	1.595928716E-05
4	7.991671171E-07	43	6.819983601E-01	5.348782369E-01	2.556334072E+00	3.994501226E+00	3.264207547E-05
2	7.778588782E-07	44	6.946583705E-01	5.174497484E-01	2.686567334E+00	3.993904720E+00	1.669268655E-05
4	7.558264998E-07	45	7.071067812E-01	5.000000000E-01	2.828427125E+00	3.993236162E+00	3.414696384E-05
2	7.330709441E-07	46	7.193398003E-01	4.825502516E-01	2.983226171E+00	3.992485171E+00	1.746246280E-05
4	7.095971098E-07	47	7.313537016E-01	4.651217631E-01	3.152463079E+00	3.991639602E+00	3.571685091E-05
2	6.854145054E-07	48	7.431448255E-01	4.477357684E-01	3.3378533831E+00	3.990685188E+00	1.825988636E-05
4	6.605379924E-07	49	7.547095802E-01	4.304134495E-01	3.541369556E+00	3.989605116E+00	3.733008296E-05
2	6.349885995E-07	50	7.660444431E-01	4.131759112E-01	3.765282014E+00	3.988379492E+00	1.907172202E-05
4	6.087944029E-07	51	7.771459615E-01	3.960441546E-01	4.012218614E+00	3.986984690E+00	3.895469413E-05

Таблица 2.43 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 1, Катамаран, Корпус Виглея 1, МКК, усовersh. формула Ньюмена, $F_n = 0.3$, $2p/L = 0.3$ – продолжение.

2	5.819914655E-07	52	7.880107536E-01	3.790390522E-01	4.285229282E+00	3.985392525E+00	1.987887384E-05
4	5.546248233E-07	53	7.986355100E-01	3.621813221E-01	4.587868120E+00	3.983569236E+00	4.054549342E-05
2	5.267494963E-07	54	8.090169944E-01	3.454915028E-01	4.924293659E+00	3.981474195E+00	2.065484661E-05
4	4.984314966E-07	55	8.191520443E-01	3.289899283E-01	5.299392612E+00	3.979058266E+00	4.204088639E-05
2	4.697487930E-07	56	8.290375726E-01	3.126967033E-01	5.718933494E+00	3.976261734E+00	2.136415295E-05
4	4.407921788E-07	57	8.386705679E-01	2.966316785E-01	6.189758519E+00	3.973011625E+00	4.335981427E-05
2	4.116659729E-07	58	8.480480962E-01	2.808144266E-01	6.720024814E+00	3.969218264E+00	2.196093489E-05
4	3.824884719E-07	59	8.571673007E-01	2.652642186E-01	7.319509720E+00	3.964770792E+00	4.439953467E-05
2	3.533920469E-07	60	8.660254038E-01	2.500000000E-01	8.000000000E+00	3.959531293E+00	2.238826989E-05
4	3.245227709E-07	61	8.746197071E-01	2.350403679E-01	8.775791828E+00	3.953327041E+00	4.503542054E-05
2	2.960394429E-07	62	8.829475929E-01	2.204035483E-01	9.664338369E+00	3.945940180E+00	2.257886974E-05
4	2.681118762E-07	63	8.910065242E-01	2.061073739E-01	1.068709587E+01	3.937093868E+00	4.512440807E-05
2	2.409183259E-07	64	8.987940463E-01	1.921692623E-01	1.187063948E+01	3.926433501E+00	2.245805775E-05
4	2.146419554E-07	65	9.063077870E-01	1.786061952E-01	1.324814955E+01	3.913501032E+00	4.451386271E-05
2	1.894663007E-07	66	9.135454576E-01	1.654346968E-01	1.486141289E+01	3.897699515E+00	2.194979288E-05
4	1.655697714E-07	67	9.205048535E-01	1.526708148E-01	1.676354888E+01	3.878243614E+00	4.305683388E-05
2	1.431193481E-07	68	9.271838546E-01	1.403300998E-01	1.902276964E+01	3.854089862E+00	2.098572272E-05
4	1.222637835E-07	69	9.335804265E-01	1.284275873E-01	2.172763788E+01	3.823837314E+00	4.063214444E-05
2	1.031267743E-07	70	9.396926208E-01	1.169777784E-01	2.499452836E+01	3.785584629E+00	1.951548438E-05
4	8.580071870E-08	71	9.455185756E-01	1.059946232E-01	2.897838960E+01	3.736722576E+00	3.716344964E-05
2	7.034175773E-08	72	9.510565163E-01	9.549150281E-02	3.388854382E+01	3.673630560E+00	1.751425220E-05
4	5.676677059E-08	73	9.563047560E-01	8.548121372E-02	4.001234272E+01	3.591231157E+00	3.262808011E-05
2	4.505279830E-08	74	9.612616959E-01	7.597595192E-02	4.775136325E+01	3.482338354E+00	1.498333561E-05
4	3.513898858E-08	75	9.659258263E-01	6.698729811E-02	5.767814816E+01	3.336720521E+00	2.705081715E-05
2	2.693061945E-08	76	9.702957263E-01	5.852620357E-02	7.062760340E+01	3.139817654E+00	1.194414963E-05

Таблица 2.44 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 1, Катамаран, Корпус Виглея 1, МКК, усoверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.7$, $2p/L = 0.4$

MC	I^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIFT	fR_w
1	1.779569086E-06	0	0.00000000E+00	1.00000000E+00	1.00000000E+00	4.00000000E+00	7.118276345E-06
4	1.779518096E-06	1	1.745240644E-02	9.996954133E-01	1.000457054E+00	3.99999938E+00	2.848530246E-05
2	1.779365010E-06	2	3.489949670E-02	9.987820251E-01	1.001829748E+00	3.99999752E+00	1.426096551E-05
4	1.779109488E-06	3	5.233595624E-02	9.972609477E-01	1.004122691E+00	3.999999441E+00	2.858310331E-05
2	1.778750959E-06	4	6.975647374E-02	9.951340344E-01	1.007343597E+00	3.999999003E+00	1.433450355E-05
4	1.778288620E-06	5	8.715574275E-02	9.924038765E-01	1.011503342E+00	3.999998435E+00	2.877990684E-05
2	1.777721431E-06	6	1.045284633E-01	9.890738004E-01	1.016616029E+00	3.999997733E+00	1.445807262E-05
4	1.777048114E-06	7	1.218693434E-01	9.851478631E-01	1.022699092E+00	3.999996894E+00	2.907814531E-05
2	1.776267143E-06	8	1.391731010E-01	9.806308480E-01	1.029773410E+00	3.999995912E+00	1.463320643E-05
4	1.775376739E-06	9	1.564344650E-01	9.755282581E-01	1.037863452E+00	3.999994781E+00	2.948153964E-05
2	1.774374861E-06	10	1.736481777E-01	9.698463104E-01	1.046997448E+00	3.999993494E+00	1.486210343E-05
4	1.773259196E-06	11	1.908089954E-01	9.635919273E-01	1.057207586E+00	3.999992042E+00	2.999518950E-05
2	1.772027149E-06	12	2.079116908E-01	9.567727288E-01	1.068530241E+00	3.999990417E+00	1.514768049E-05
4	1.770675830E-06	13	2.249510543E-01	9.493970231E-01	1.081006242E+00	3.999988606E+00	3.062569875E-05
2	1.769202040E-06	14	2.419218956E-01	9.414737964E-01	1.094681162E+00	3.999986600E+00	1.549364525E-05
4	1.767602254E-06	15	2.588190451E-01	9.330127019E-01	1.109605666E+00	3.999984383E+00	3.138134111E-05
2	1.765872608E-06	16	2.756373558E-01	9.240240481E-01	1.125835889E+00	3.999981941E+00	1.590459026E-05
4	1.764008872E-06	17	2.923717047E-01	9.145187863E-01	1.143433872E+00	3.999979257E+00	3.227227255E-05
2	1.762006436E-06	18	3.090169944E-01	9.045084972E-01	1.162468045E+00	3.999976313E+00	1.638611237E-05
4	1.759860280E-06	19	3.255681545E-01	8.940053768E-01	1.183013781E+00	3.999973086E+00	3.331079930E-05
2	1.757564955E-06	20	3.420201433E-01	8.830222216E-01	1.205154011E+00	3.999969553E+00	1.694496266E-05
4	1.755114544E-06	21	3.583679495E-01	8.715724127E-01	1.228979919E+00	3.999965689E+00	3.451171247E-05
2	1.752502640E-06	22	3.746065934E-01	8.596699002E-01	1.254591725E+00	3.999961464E+00	1.758923302E-05
4	1.749722303E-06	23	3.907311285E-01	8.473291852E-01	1.282099562E+00	3.999956845E+00	3.589270395E-05
2	1.746766027E-06	24	4.067366431E-01	8.345653032E-01	1.311624476E+00	3.999951796E+00	1.832858772E-05
4	1.743625693E-06	25	4.226182617E-01	8.213938048E-01	1.343299538E+00	3.999946276E+00	3.747488208E-05

Таблица 2.44 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 1, Катамаран, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. Ньюмена, $F_n = 0.7, 2p/L = 0.4$ – продолжение.

2	1.740292523E-06	26	4.383711468E-01	8.078307377E-01	1.377271115E+00	3.999940239E+00	1.917455050E-05
4	1.736757029E-06	27	4.539904997E-01	7.938926261E-01	1.413700292E+00	3.999933634E+00	3.928341093E-05
2	1.733008956E-06	28	4.694715628E-01	7.795964517E-01	1.452764502E+00	3.999926404E+00	2.014086056E-05
4	1.729037218E-06	29	4.848096202E-01	7.649596321E-01	1.494659352E+00	3.999918484E+00	4.134830372E-05
2	1.724829829E-06	30	5.000000000E-01	7.500000000E-01	1.539600718E+00	3.999909803E+00	2.124391489E-05
4	1.720373824E-06	31	5.150380749E-01	7.347357814E-01	1.587827117E+00	3.999900278E+00	4.370540971E-05
2	1.715655179E-06	32	5.299192642E-01	7.191855734E-01	1.639602416E+00	3.999889818E+00	2.250331913E-05
4	1.710658715E-06	33	5.446390350E-01	7.033683215E-01	1.695218929E+00	3.999878318E+00	4.639764509E-05
2	1.705367994E-06	34	5.591929035E-01	6.873032967E-01	1.755000964E+00	3.999865662E+00	2.394257567E-05
4	1.699765206E-06	35	5.735764364E-01	6.710100717E-01	1.819308890E+00	3.999851715E+00	4.947653298E-05
2	1.693831042E-06	36	5.877852523E-01	6.545084972E-01	1.888543820E+00	3.999836326E+00	2.558994603E-05
4	1.687544555E-06	37	6.018150232E-01	6.378186779E-01	1.963153011E+00	3.999819323E+00	5.300413653E-05
2	1.673821689E-06	38	6.156614753E-01	6.209609478E-01	2.043636109E+00	3.999800507E+00	2.736409474E-05
4	1.673821689E-06	39	6.293203910E-01	6.039558454E-01	2.130552383E+00	3.999779655E+00	5.705549347E-05
2	1.666333746E-06	40	6.427876097E-01	5.868240888E-01	2.224529146E+00	3.999756506E+00	2.965265871E-05
4	1.658389953E-06	41	6.560590290E-01	5.695865505E-01	2.326271560E+00	3.999730763E+00	6.172169139E-05
2	1.649958485E-06	42	6.691306064E-01	5.522642316E-01	2.436574112E+00	3.999702083E+00	3.215957363E-05
4	1.641004660E-06	43	6.819983601E-01	5.348782369E-01	2.556334072E+00	3.999670069E+00	6.711376181E-05
2	1.631490651E-06	44	6.946583705E-01	5.174497484E-01	2.686567334E+00	3.999634261E+00	3.506166977E-05
4	1.621375166E-06	45	7.071067812E-01	5.000000000E-01	2.828427125E+00	3.999594124E+00	7.336761867E-05
2	1.610613093E-06	46	7.193398003E-01	4.825502516E-01	2.983226171E+00	3.999549032E+00	3.843425140E-05
4	1.599155114E-06	47	7.313537016E-01	4.651217631E-01	3.152463079E+00	3.999498256E+00	8.065032155E-05
2	1.586947269E-06	48	7.431448255E-01	4.477357684E-01	3.337853831E+00	3.999440936E+00	4.237006145E-05
4	1.573930481E-06	49	7.547095802E-01	4.304134495E-01	3.541369556E+00	3.999376058E+00	8.916800075E-05
2	1.560040032E-06	50	7.660444431E-01	4.131759112E-01	3.765282014E+00	3.999302425E+00	4.698373027E-05
4	1.545204985E-06	51	7.771459615E-01	3.960441546E-01	4.012218614E+00	3.999218609E+00	9.917582567E-05
2	1.529347559E-06	52	7.880107536E-01	3.790390522E-01	4.285229282E+00	3.9991122912E+00	5.241734336E-05

Таблица 2.44 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна $R_w [N]$, Исследование 1, Катамаран, Корпус Виглея 1, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_n = 0.7$, $2p/L = 0.4$ – продолжение.

4	1.512382448E-06	53	7.986355100E-01	3.621813221E-01	4.587868120E+00	3.999013294E+00	1.109903940E-04
2	1.494216089E-06	54	8.090169944E-01	3.454915028E-01	4.924293659E+00	3.998887298E+00	5.884729608E-05
4	1.474745880E-06	55	8.191520443E-01	3.289899283E-01	5.299392612E+00	3.998741953E+00	1.250047909E-04
2	1.453859367E-06	56	8.290375726E-01	3.126967033E-01	5.718933494E+00	3.998573642E+00	6.649248125E-05
4	1.431433410E-06	57	8.386705679E-01	2.966316783E-01	6.189758519E+00	3.998377938E+00	1.417061469E-04
2	1.407333335E-06	58	8.480480962E-01	2.808144266E-01	6.720024814E+00	3.998149395E+00	7.562351680E-05
4	1.381412239E-06	59	8.571673007E-01	2.652642186E-01	7.319509720E+00	3.997881270E+00	1.616944728E-04
2	1.353510161E-06	60	8.660254038E-01	2.500000000E-01	8.000000000E+00	3.997565153E+00	8.657192085E-05
4	1.323453779E-06	61	8.746197071E-01	2.350403679E-01	8.775791828E+00	3.997190491E+00	1.856991552E-04
2	1.291056199E-06	62	8.829475929E-01	2.204035483E-01	9.664338369E+00	3.996743933E+00	9.973637849E-05
4	1.256117364E-06	63	8.910065242E-01	2.061073739E-01	1.068709587E+01	3.996208457E+00	2.145843528E-04
2	1.218425223E-06	64	8.987940463E-01	1.921692623E-01	1.187063948E+01	3.995562173E+00	1.155795196E-04
4	1.177758053E-06	65	9.063077870E-01	1.786061952E-01	1.324814955E+01	3.994776667E+00	2.493238358E-04
2	1.133888420E-06	66	9.135454576E-01	1.654346968E-01	1.486141289E+01	3.993814688E+00	1.346010122E-04
4	1.086589467E-06	67	9.205048535E-01	1.526708148E-01	1.676354888E+01	3.992626875E+00	2.909043214E-04
2	1.035644412E-06	68	9.271838546E-01	1.403300998E-01	1.902276964E+01	3.991147053E+00	1.572577799E-04
4	9.808604431E-07	69	9.335804265E-01	1.284275873E-01	2.172763788E+01	3.989285370E+00	3.400750969E-04
2	9.220884619E-07	70	9.396926208E-01	1.169777784E-01	2.499452836E+01	3.986918144E+00	1.837743302E-04
4	8.592504302E-07	71	9.455185756E-01	1.059946232E-01	2.897838960E+01	3.983872524E+00	3.967888228E-04
2	7.923762199E-07	72	9.510565163E-01	9.549150281E-02	3.388854382E+01	3.979902918E+00	2.137404972E-04
4	7.216516682E-07	73	9.563047560E-01	8.548121372E-02	4.001234272E+01	3.974653948E+00	4.590721156E-04
2	6.474785971E-07	74	9.612616959E-01	7.597595192E-02	4.775136325E+01	3.967600866E+00	2.453404536E-04
4	5.705451954E-07	75	9.659258263E-01	6.698729811E-02	5.767814816E+01	3.957951217E+00	5.209928812E-04
2	4.919004091E-07	76	9.702957263E-01	5.852620357E-02	7.062760340E+01	3.944477846E+00	2.740761028E-04
4	4.130177258E-07	77	9.743700648E-01	5.060297685E-02	8.784881363E+01	3.925226221E+00	5.696777723E-04

Таблица 2.45 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 2, Катамаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.3$

MC	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	fR_w
1	2.863775937E-09	0	0.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00	4.000000000E+00	1.145510375E-08
4	3.262105801E-10	1	1.745240644E-02	9.996954135E-01	1.000457054E+00	3.999999980E+00	5.221754787E-09
2	3.264873461E-10	2	3.489949670E-02	9.987820251E-01	1.001829748E+00	3.999999918E+00	2.616677831E-09
4	3.269492893E-10	3	5.233595624E-02	9.972609477E-01	1.004122691E+00	3.999999816E+00	5.252754958E-09
2	3.275974125E-10	4	6.975647374E-02	9.951340344E-01	1.007343597E+00	3.999999671E+00	2.640025031E-09
4	3.284331260E-10	5	8.715574275E-02	9.924038765E-01	1.011503342E+00	3.999999484E+00	5.315378587E-09
2	3.294582534E-10	6	1.045284633E-01	9.890738004E-01	1.016616029E+00	3.999999253E+00	2.679459830E-09
4	3.306750396E-10	7	1.218693434E-01	9.851478631E-01	1.022699092E+00	3.999998976E+00	5.410895621E-09
2	3.320861611E-10	8	1.391731010E-01	9.806308480E-01	1.029773410E+00	3.999998652E+00	2.735787067E-09
4	3.336947376E-10	9	1.564344650E-01	9.755282581E-01	1.037863452E+00	3.999998279E+00	5.541270773E-09
2	3.355043456E-10	10	1.736481777E-01	9.698463104E-01	1.046997448E+00	3.999997855E+00	2.810176042E-09
4	3.375190351E-10	11	1.908089954E-01	9.635919273E-01	1.057207586E+00	3.999997376E+00	5.709239202E-09
2	3.397433475E-10	12	2.079116908E-01	9.567727288E-01	1.068530241E+00	3.999996840E+00	2.904206035E-09
4	3.421823364E-10	13	2.249510543E-01	9.493970231E-01	1.081006242E+00	3.999996243E+00	5.918414304E-09
2	3.448415905E-10	14	2.419218956E-01	9.414737964E-01	1.094681162E+00	3.999995582E+00	3.019929408E-09
4	3.477272602E-10	15	2.588190451E-01	9.330127019E-01	1.109605666E+00	3.999994851E+00	6.173434263E-09
2	3.508460859E-10	16	2.756373558E-01	9.240240481E-01	1.125835889E+00	3.999994046E+00	3.159956217E-09
4	3.542054300E-10	17	2.923717047E-01	9.145187863E-01	1.143433872E+00	3.999993161E+00	6.480156699E-09
2	3.578133125E-10	18	3.090169944E-01	9.045084972E-01	1.162468045E+00	3.999992190E+00	3.327565836E-09
4	3.616784493E-10	19	3.255681545E-01	8.940053768E-01	1.183013781E+00	3.999991126E+00	6.845914249E-09
2	3.658102956E-10	20	3.420201433E-01	8.830222216E-01	1.205154011E+00	3.999989961E+00	3.526853109E-09
4	3.702190926E-10	21	3.583679495E-01	8.715724127E-01	1.228979919E+00	3.999988687E+00	7.279848699E-09
2	3.749159190E-10	22	3.746065934E-01	8.596699002E-01	1.254591725E+00	3.999987294E+00	3.762919322E-09
4	3.799127477E-10	23	3.907311285E-01	8.4733291852E-01	1.282099562E+00	3.999985771E+00	7.793347757E-09
2	3.852225081E-10	24	4.067366431E-01	8.345653032E-01	1.311624476E+00	3.999984106E+00	4.042122101E-09

Таблица 2.45 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 2, Катамаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.3$

4	3.908591531E-10	25	4.226182617E-01	8.213938048E-01	1.343299538E+00	3.999982286E+00	8.400617516E-09
2	3.968377344E-10	26	4.3837111468E-01	8.078307377E-01	1.377271115E+00	3.999980295E+00	4.372403651E-09
4	4.031744833E-10	27	4.539904997E-01	7.938926261E-01	1.413700292E+00	3.999978117E+00	9.119436269E-09
2	4.098868998E-10	28	4.694715628E-01	7.795964517E-01	1.452764502E+00	3.999975733E+00	4.763724202E-09
4	4.169938500E-10	29	4.848096202E-01	7.649596321E-01	1.494659352E+00	3.999973122E+00	9.972153112E-09
2	4.245156723E-10	30	5.000000000E-01	7.500000000E-01	1.539600718E+00	3.999970259E+00	5.228638194E-09
4	4.324742942E-10	31	5.150380749E-01	7.347357814E-01	1.587827117E+00	3.999967119E+00	1.098702027E-08
2	4.408933592E-10	32	5.299192642E-01	7.191855734E-01	1.639602416E+00	3.999963670E+00	5.783066008E-09
4	4.497983660E-10	33	5.446390350E-01	7.033683215E-01	1.695218929E+00	3.999959878E+00	1.219998490E-08
2	4.592168203E-10	34	5.591929035E-01	6.873032967E-01	1.755000964E+00	3.999955705E+00	6.447336302E-09
4	4.691784006E-10	35	5.735764364E-01	6.710100717E-01	1.819308890E+00	3.999951106E+00	1.365712002E-08
2	4.797151390E-10	36	5.87785253E-01	6.545084972E-01	1.888543820E+00	3.999946032E+00	7.247606703E-09
4	4.908616185E-10	37	6.018150232E-01	6.378186779E-01	1.963153011E+00	3.999940425E+00	1.541795380E-08
2	5.026551874E-10	38	6.156614753E-01	6.209609478E-01	2.043636109E+00	3.999934221E+00	8.217819189E-09
4	5.151361931E-10	39	6.293203910E-01	6.039558454E-01	2.130552383E+00	3.999927345E+00	1.756007534E-08
2	5.283482345E-10	40	6.427876097E-01	5.868240888E-01	2.224529146E+00	3.999919712E+00	9.402419647E-09
4	5.423384368E-10	41	6.560590290E-01	5.695865505E-01	2.326271560E+00	3.999911224E+00	2.018557569E-08
2	5.571577467E-10	42	6.691306064E-01	5.522642316E-01	2.436574112E+00	3.999901767E+00	1.086018242E-08
4	5.728612507E-10	43	6.819983601E-01	5.348782369E-01	2.556334072E+00	3.999891211E+00	2.343015848E-08
2	5.895085146E-10	44	6.946583705E-01	5.174497484E-01	2.686567334E+00	3.999879403E+00	1.266965256E-08
4	6.071639449E-10	45	7.071067812E-01	5.000000000E-01	2.828427125E+00	3.999866168E+00	2.747618421E-08
2	6.258971696E-10	46	7.193398003E-01	4.825502516E-01	2.983226171E+00	3.999851300E+00	1.493698723E-08
4	6.457834346E-10	47	7.313537016E-01	4.651217631E-01	3.152463079E+00	3.999834557E+00	3.257158772E-08
2	6.669040110E-10	48	7.431448255E-01	4.477357684E-01	3.337853831E+00	3.999815656E+00	1.780740415E-08
4	6.893466036E-10	49	7.547095802E-01	4.304134495E-01	3.541369556E+00	3.999794262E+00	3.905768820E-08
2	7.132057499E-10	50	7.660444431E-01	4.131759112E-01	3.765282014E+00	3.999769981E+00	2.148213087E-08

Таблица 2.45 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 2, Катамаран, МКК, усoверш. формула Мичеля-Вигля, $F_n = 0.8$, $2p/L = 0.3$ – продолжение.

4	7.385831897E-10	51	7.771459615E-01	3.960441546E-01	4.012218614E+00	3.999742343E+00	4.741066143E-08
2	7.655881804E-10	52	7.880107536E-01	3.790390522E-01	4.285229282E+00	3.999710786E+00	2.624386945E-08
4	7.943377233E-10	53	7.986355100E-01	3.621813221E-01	4.587868120E+00	3.999674638E+00	5.830432458E-08
2	8.249566497E-10	54	8.090169944E-01	3.454915028E-01	4.924293659E+00	3.999633089E+00	3.249564937E-08
4	8.575774994E-10	55	8.191520443E-01	3.289899283E-01	5.299392612E+00	3.999585159E+00	7.270669661E-08
2	8.923400981E-10	56	8.290375726E-01	3.126967033E-01	5.718933494E+00	3.999529653E+00	4.082106882E-08
4	9.293907051E-10	57	8.386705679E-01	2.966316785E-01	6.189758519E+00	3.999465114E+00	9.203095638E-08
2	9.688805582E-10	58	8.480480962E-01	2.808144266E-01	6.720024814E+00	3.999389742E+00	5.207926449E-08
4	1.010963579E-09	59	8.571673007E-01	2.652642186E-01	7.319509720E+00	3.999301314E+00	1.183754434E-07
2	1.055792917E-09	60	8.660254038E-01	2.500000000E-01	8.000000000E+00	3.999197056E+00	6.755718280E-08
4	1.103515906E-09	61	8.746197071E-01	2.350403679E-01	8.775791828E+00	3.999073483E+00	1.549117235E-07
2	1.154266838E-09	62	8.829475929E-01	2.204035483E-01	9.664338369E+00	3.998926191E+00	8.921784514E-08
4	1.208156789E-09	63	8.910065242E-01	2.061073739E-01	1.068709587E+01	3.998749561E+00	2.065224179E-07
2	1.265259438E-09	64	8.987940463E-01	1.921692623E-01	1.187063948E+01	3.998536365E+00	1.201115432E-07
4	1.325591497E-09	65	9.063077870E-01	1.786061952E-01	1.324814955E+01	3.998277222E+00	2.808651310E-07
2	1.389085939E-09	66	9.135454576E-01	1.654346968E-01	1.486141289E+01	3.997959829E+00	1.650660038E-07
4	1.455555661E-09	67	9.205048535E-01	1.526708148E-01	1.676354888E+01	3.997567878E+00	3.901670778E-07
2	1.524644606E-09	68	9.271838546E-01	1.403300998E-01	1.902276964E+01	3.997079498E+00	2.318542986E-07
4	1.595762697E-09	69	9.335804265E-01	1.284275873E-01	2.172763788E+01	3.996464978E+00	5.542641972E-07
2	1.668000396E-09	70	9.396926208E-01	1.169777784E-01	2.499452836E+01	3.995683400E+00	3.331671398E-07
4	1.740018544E-09	71	9.455185756E-01	1.059946232E-01	2.897838960E+01	3.994677533E+00	8.056934670E-07
2	1.809910114E-09	72	9.510565163E-01	9.549150281E-02	3.388854382E+01	3.993365989E+00	4.898679487E-07
4	1.875033691E-09	73	9.563047560E-01	8.548121372E-02	4.001234272E+01	3.991630849E+00	1.197880286E-06
2	1.931826193E-09	74	9.612616959E-01	7.597595192E-02	4.775136325E+01	3.989297715E+00	7.360041597E-07
4	1.975617952E-09	75	9.659258263E-01	6.698729811E-02	5.767814816E+01	3.986102641E+00	1.816865344E-06

Таблица 2.46 Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 2, Катамаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$

MC	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	fR_w
1	6.555774244E-09	0	0.00000000E+00	1.00000000E+00	1.00000000E+00	4.00000000E+00	2.622309698E-08
4	1.371450145E-10	1	1.745240644E-02	9.996954135E-01	1.000457054E+00	3.99999977E+00	2.195323142E-09
2	1.372646035E-10	2	3.489949670E-02	9.987820251E-01	1.001829748E+00	3.999999907E+00	1.100126079E-09
4	1.374642198E-10	3	5.233595624E-02	9.972609477E-01	1.004122691E+00	3.999999790E+00	2.208494959E-09
2	1.377443165E-10	4	6.975647374E-02	9.951340344E-01	1.007343597E+00	3.999999626E+00	1.110046738E-09
4	1.381055312E-10	5	8.715574275E-02	9.924038765E-01	1.011503342E+00	3.999999413E+00	2.235106974E-09
2	1.385486889E-10	6	1.045284633E-01	9.890738004E-01	1.016616029E+00	3.999999150E+00	1.126806304E-09
4	1.390748054E-10	7	1.218693434E-01	9.851478631E-01	1.022699092E+00	3.999998835E+00	2.275706172E-09
2	1.396850927E-10	8	1.391731010E-01	9.806308480E-01	1.029773410E+00	3.999998466E+00	1.150751513E-09
4	1.403809645E-10	9	1.564344650E-01	9.755282581E-01	1.037863452E+00	3.999998042E+00	2.331139218E-09
2	1.411640432E-10	10	1.736481777E-01	9.698463104E-01	1.046997448E+00	3.999997559E+00	1.182386422E-09
4	1.420361673E-10	11	1.908089954E-01	9.635919273E-01	1.057207586E+00	3.999997015E+00	2.402585622E-09
2	1.429994008E-10	12	2.079116908E-01	9.567727288E-01	1.068530241E+00	3.999996405E+00	1.222392376E-09
4	1.440560435E-10	13	2.249510543E-01	9.493970231E-01	1.081006242E+00	3.999995726E+00	2.491605052E-09
2	1.452086418E-10	14	2.419218956E-01	9.414737964E-01	1.094681162E+00	3.999994973E+00	1.271655719E-09
4	1.464600022E-10	15	2.588190451E-01	9.350127019E-01	1.109605666E+00	3.999994141E+00	2.600201763E-09
2	1.478132052E-10	16	2.756373558E-01	9.240240481E-01	1.125835889E+00	3.999993225E+00	1.331305035E-09
4	1.492716215E-10	17	2.923717047E-01	9.145187863E-01	1.143433872E+00	3.999992218E+00	2.730910337E-09

Таблица 2.46 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 2, Катамаран, МКК, усoверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$ – продолжение.

2	1.508389297E-10	18	3.090169944E-01	9.045084972E-01	1.162468045E+00	3.999911114E+00	1.402760369E-09
4	1.525191354E-10	19	3.255681545E-01	8.940053768E-01	1.183013781E+00	3.999989903E+00	2.886908538E-09
2	1.543165935E-10	20	3.420201433E-01	8.830222216E-01	1.205154011E+00	3.999988578E+00	1.487797845E-09
4	1.562360317E-10	21	3.583679495E-01	8.715724127E-01	1.228979919E+00	3.999987128E+00	3.072165245E-09
2	1.582825770E-10	22	3.746065934E-01	8.596699002E-01	1.254591725E+00	3.999985543E+00	1.588634348E-09
4	1.604617847E-10	23	3.907311285E-01	8.473291852E-01	1.282099562E+00	3.999983810E+00	3.291634421E-09
2	1.627796711E-10	24	4.067366431E-01	8.345653032E-01	1.311624476E+00	3.999981916E+00	1.708038685E-09
4	1.652427483E-10	25	4.226182617E-01	8.213938048E-01	1.343299538E+00	3.999979845E+00	3.551510224E-09
2	1.678580635E-10	26	4.383711468E-01	8.078307377E-01	1.377271115E+00	3.999977580E+00	1.849478132E-09
4	1.706332427E-10	27	4.539904997E-01	7.938926261E-01	1.413700292E+00	3.999975102E+00	3.859564218E-09
2	1.735765378E-10	28	4.694715628E-01	7.795964517E-01	1.452764502E+00	3.999972390E+00	2.017312735E-09
4	1.766968796E-10	29	4.848096202E-01	7.649596321E-01	1.494659352E+00	3.999969419E+00	4.225593990E-09
2	1.800039360E-10	30	5.000000000E-01	7.500000000E-01	1.539600718E+00	3.999966162E+00	2.217054757E-09
4	1.835081764E-10	31	5.150380749E-01	7.347357814E-01	1.587827117E+00	3.999962588E+00	4.662024535E-09
2	1.872209431E-10	32	5.299192642E-01	7.191855734E-01	1.639602416E+00	3.999958664E+00	2.455717907E-09
4	1.911545302E-10	33	5.446390350E-01	7.033683215E-01	1.695218929E+00	3.999954350E+00	5.184721276E-09
2	1.953222710E-10	34	5.591929035E-01	6.873032967E-01	1.755000964E+00	3.999949602E+00	2.742291639E-09
4	1.997386353E-10	35	5.735764364E-01	6.710100717E-01	1.819308890E+00	3.999944369E+00	5.814099536E-09
2	2.044193370E-10	36	5.877852523E-01	6.545084972E-01	1.888543820E+00	3.999938596E+00	3.088391595E-09
4	2.093814541E-10	37	6.018150232E-01	6.378186779E-01	1.963153011E+00	3.999932217E+00	6.576653866E-09
2	2.146435612E-10	38	6.156614753E-01	6.209609478E-01	2.043636109E+00	3.999925158E+00	3.509160999E-09
4	2.202258781E-10	39	6.293203910E-01	6.039558454E-01	2.13052383E+00	3.999917335E+00	7.507089167E-09
2	2.261504343E-10	40	6.427876097E-01	5.868240888E-01	2.224529146E+00	3.999908650E+00	4.024533949E-09
4	2.324412525E-10	41	6.560590290E-01	5.695865505E-01	2.326271560E+00	3.999898993E+00	8.651325134E-09
2	2.391245532E-10	42	6.691306064E-01	5.522642316E-01	2.436574112E+00	3.999888233E+00	4.661027326E-09
4	2.462289827E-10	43	6.819983601E-01	5.348782369E-01	2.556334072E+00	3.999876222E+00	1.007078496E-08
2	2.537858671E-10	44	6.946583705E-01	5.174497484E-01	2.686567334E+00	3.999862788E+00	5.454315458E-09
4	2.618294957E-10	45	7.071067812E-01	5.000000000E-01	2.828427125E+00	3.999847730E+00	1.184859930E-08

Таблица 2.46 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 2, Катамаран, МКК, усoверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$ – продолжение.

2	2.703974368E-10	46	7.193398003E-01	4.825502516E-01	2.983226171E+00	3.999830813E+00	6.452980728E-09
4	2.795308895E-10	47	7.313537016E-01	4.651217631E-01	3.152463079E+00	3.999811763E+00	1.409870943E-08
2	2.892750751E-10	48	7.431448255E-01	4.477357684E-01	3.337853831E+00	3.999790258E+00	7.724058306E-09
4	2.996796723E-10	49	7.547095802E-01	4.304134495E-01	3.541369556E+00	3.999765917E+00	1.697942978E-08
2	3.107992987E-10	50	7.660444431E-01	4.131759112E-01	3.765282014E+00	3.999738291E+00	9.361363544E-09
4	3.226940445E-10	51	7.771459615E-01	3.960441546E-01	4.012218614E+00	3.999706845E+00	2.071398662E-08
2	3.354300588E-10	52	7.880107536E-01	3.790390522E-01	4.285229282E+00	3.999670940E+00	1.149821170E-08
4	3.490801911E-10	53	7.986355100E-01	3.621813221E-01	4.587868120E+00	3.999629812E+00	2.562217060E-08
2	3.637246881E-10	54	8.090169944E-01	3.454915028E-01	4.924293659E+00	3.999582539E+00	1.432720198E-08
4	3.794519417E-10	55	8.191520443E-01	3.289899283E-01	5.299392612E+00	3.999528005E+00	3.217004059E-08
2	3.963592792E-10	56	8.290375726E-01	3.126967033E-01	5.718933494E+00	3.999464853E+00	1.813159277E-08
4	4.145537801E-10	57	8.386705679E-01	2.966316785E-01	6.189758519E+00	3.999391422E+00	4.104955826E-08
2	4.341530911E-10	58	8.480480962E-01	2.808144266E-01	6.720024814E+00	3.999305667E+00	2.333610490E-08
4	4.552861944E-10	59	8.571673007E-01	2.652642186E-01	7.319509720E+00	3.999205057E+00	5.330895110E-08
2	4.780940593E-10	60	8.660254038E-01	2.500000000E-01	8.000000000E+00	3.999086436E+00	3.059103149E-08
4	5.027300703E-10	61	8.746197071E-01	2.350403679E-01	8.775791828E+00	3.998945841E+00	7.057106789E-08
2	5.293600684E-10	62	8.829475929E-01	2.204035483E-01	9.664338369E+00	3.998778259E+00	4.091481792E-08
4	5.581617677E-10	63	8.910065242E-01	2.061073739E-01	1.068709587E+01	3.998577298E+00	9.540810680E-08
2	5.893231882E-10	64	8.987940463E-01	1.921692623E-01	1.187063948E+01	3.998334737E+00	5.594184567E-08
4	6.230395823E-10	65	9.063077870E-01	1.786061952E-01	1.324814955E+01	3.998039901E+00	1.320012293E-07
2	6.595080853E-10	66	9.135454576E-01	1.654346968E-01	1.486141289E+01	3.997678793E+00	7.836427435E-08
4	6.989189673E-10	67	9.205048535E-01	1.526708148E-01	1.676354888E+01	3.997232863E+00	1.873321132E-07
2	7.414418554E-10	68	9.271838546E-01	1.403300998E-01	1.902276964E+01	3.996677229E+00	1.127404904E-07
4	7.872045649E-10	69	9.335804265E-01	1.284275873E-01	2.172763788E+01	3.995978094E+00	2.733903673E-07
2	8.362611569E-10	70	9.396926208E-01	1.169777784E-01	2.499452836E+01	3.995088912E+00	1.670103229E-07
4	8.885444228E-10	71	9.455185756E-01	1.059946232E-01	2.897838960E+01	3.993944586E+00	4.113537100E-07

Таблица 2.46 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 2, Катамаран, МКК, усовersh. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$ – продолжение.

2	9.437961305E-10	72	9.510565163E-01	9.549150281E-02	3.38854382E+01	3.992452545E+00	2.553882185E-07
4	1.001466051E-09	73	9.563047560E-01	8.548121372E-02	4.001234272E+01	3.990478682E+00	6.396099310E-07
2	1.060568341E-09	74	9.612616959E-01	7.597595192E-02	4.775136325E+01	3.987824676E+00	4.039154689E-07
4	1.119482235E-09	75	9.659258263E-01	6.698729811E-02	5.767814816E+01	3.984190421E+00	1.029031319E-06
2	1.175685816E-09	76	9.702957263E-01	5.852620357E-02	7.062760340E+01	3.979109890E+00	6.608177152E-07
4	1.225422615E-09	77	9.743700648E-01	5.060297685E-02	8.784881363E+01	3.971837931E+00	1.710303964E-06
2	1.263332977E-09	78	9.781476007E-01	4.322727118E-02	1.112662033E+02	3.961142711E+00	1.113606063E-06
4	1.282157077E-09	79	9.816271834E-01	3.640807272E-02	1.439472807E+02	3.944908515E+00	2.912336991E-06
2	1.272765175E-09	80	9.848077530E-01	3.015368961E-02	1.909806249E+02	3.919337519E+00	1.905374086E-06
4	1.225010468E-09	81	9.876883406E-01	2.447174185E-02	2.612177449E+02	3.877253931E+00	4.962799297E-06
2	1.130142814E-09	82	9.902680687E-01	1.936915203E-02	3.709659836E+02	3.804268547E+00	3.189837639E-06
4	9.853533816E-10	83	9.925461516E-01	1.485213686E-02	5.524800320E+02	3.669498720E+00	7.990525272E-06
2	7.995462240E-10	84	9.945218954E-01	1.092619963E-02	8.755809481E+02	3.401683415E+00	4.762815605E-06
4	5.965291515E-10	85	9.961946981E-01	7.596123494E-03	1.510469551E+03	2.827330352E+00	1.019014101E-05
2	4.131129074E-10	86	9.975640503E-01	4.865965629E-03	2.946092948E+03	1.567395358E+00	3.815256676E-06
4	3.092978676E-10	87	9.986295348E-01	2.739052316E-03	6.975888156E+03	1.573439872E-03	1.357958749E-08
1	4.573267969E-10	88	9.993908270E-01	1.217974870E-03	2.352569749E+04	3.279729237E+00	3.528638344E-05
						ΣR_{w1}	8.296871485E-05
1	4.573267969E-10	88.0000000000000000	9.993908270E-01	1.217974870E-03	2.352569749E+04	3.279729237E+00	3.528638344E-05
4	1.682033430E-09	88.9948448500138	9.998461208E-01	3.077346401E-04	1.852402771E+05	5.713335239E-03	7.120651715E-06
1	2.872514928E-09	89.9896897000276	9.99999838E-01	3.238152758E-08	1.716145086E+11	1.926217656E+00	9.495583452E+02
						ΣR_{w2}	9.495583876E+02
1	1.509354401E-26	89.9970957523684	9.999999987E-01	2.569342629E-09	7.678333410E+12	3.936620487E+00	4.562277943E-13
R_w [N] = $(4pg^2/\pi U^2) \int A(\theta) ^2 4\cos^2[0.5(2p/L)\sin\theta](Fn^2\cos^2\theta)]\sec^3\theta d\theta$					Экспериментальный R_w [N]		
					30.815		
					32.513		

Таблица 2.47 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 3, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $Fn = 1.0$, $2p/L = 0.3$

MC	I^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	fR_w
1	2.670440186E-06	0	0.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00	4.000000000E+00	1.068176074E-05
4	3.675234094E-06	1	1.745240644E-02	9.996954135E-01	1.000457054E+00	3.99999992E+00	5.883062185E-05
2	3.675424753E-06	2	3.489949670E-02	9.987820251E-01	1.001829748E+00	3.999999967E+00	2.945719858E-05
4	3.675743031E-06	3	5.233595624E-02	9.972609477E-01	1.004122691E+00	3.999999925E+00	5.905435061E-05
2	3.676189701E-06	4	6.975647374E-02	9.951340344E-01	1.007343597E+00	3.999999865E+00	2.962548827E-05
4	3.676765850E-06	5	8.715574275E-02	9.924038765E-01	1.011503342E+00	3.99999789E+00	5.950497196E-05
2	3.677472884E-06	6	1.045284633E-01	9.890738004E-01	1.016616029E+00	3.99999694E+00	2.990862076E-05
4	3.678312539E-06	7	1.218693434E-01	9.851478631E-01	1.022699092E+00	3.99999581E+00	6.018890401E-05
2	3.679286885E-06	8	1.391731010E-01	9.806308480E-01	1.029773410E+00	3.99999448E+00	3.031065024E-05
4	3.680398341E-06	9	1.564344650E-01	9.755282581E-01	1.037863452E+00	3.99999295E+00	6.111600409E-05
2	3.681649687E-06	10	1.736481777E-01	9.698463104E-01	1.046997448E+00	3.999999121E+00	3.083741584E-05
4	3.683044075E-06	11	1.908089954E-01	9.635919273E-01	1.057207586E+00	3.999998925E+00	6.229985740E-05
2	3.684585051E-06	12	2.079116908E-01	9.567772288E-01	1.068530241E+00	3.999998706E+00	3.149671424E-05
4	3.686276575E-06	13	2.249510543E-01	9.493970231E-01	1.081006242E+00	3.999998461E+00	6.375818324E-05
2	3.688123036E-06	14	2.419218956E-01	9.414737964E-01	1.094681162E+00	3.999998190E+00	3.229853587E-05
4	3.690129284E-06	15	2.588190451E-01	9.330127019E-01	1.109605666E+00	3.999997891E+00	6.551337924E-05
2	3.692300655E-06	16	2.756373558E-01	9.240240481E-01	1.125835889E+00	3.999997561E+00	3.325537645E-05
4	3.694643001E-06	17	2.923717047E-01	9.145187863E-01	1.143433872E+00	3.999997199E+00	6.759323187E-05
2	3.697162725E-06	18	3.090169944E-01	9.045084972E-01	1.162468045E+00	3.999996801E+00	3.438264070E-05
4	3.699866821E-06	19	3.255681545E-01	8.940053768E-01	1.183013781E+00	3.999996365E+00	7.003183137E-05
2	3.702762916E-06	20	3.420201433E-01	8.830222216E-01	1.205154011E+00	3.999995888E+00	3.569915996E-05
4	3.705859315E-06	21	3.583679495E-01	8.715724127E-01	1.228979919E+00	3.999995367E+00	7.287074252E-05
2	3.709165059E-06	22	3.746065934E-01	8.596699002E-01	1.254591725E+00	3.999994796E+00	3.722785387E-05
4	3.712689979E-06	23	3.907311285E-01	8.473291852E-01	1.282099562E+00	3.999994172E+00	7.616050019E-05
2	3.716444765E-06	24	4.067366431E-01	8.345653032E-01	1.311624476E+00	3.999993490E+00	3.899657587E-05

Table 2.47 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 3, Катамаран NPL, МКК, усвоерш формула Ньюмена, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.3$ - продолжение.

4	3.720441036E-06	25	4.226182617E-01	8.213938048E-01	1.343299538E+00	3.999992745E+00	7.996252259E-05
2	3.724691424E-06	26	4.383711468E-01	8.078307377E-01	1.377271115E+00	3.999991930E+00	4.103919648E-05
4	3.729209664E-06	27	4.539904997E-01	7.938926261E-01	1.413700292E+00	3.999991038E+00	8.435156767E-05
2	3.734010691E-06	28	4.694715628E-01	7.795964517E-01	1.452764502E+00	3.999990062E+00	4.339699762E-05
4	3.739110759E-06	29	4.848096202E-01	7.649596321E-01	1.494659352E+00	3.999988992E+00	8.941890374E-05
2	3.744527564E-06	30	5.000000000E-01	7.500000000E-01	1.539600718E+00	3.999987820E+00	4.612047816E-05
4	3.750280383E-06	31	5.150380749E-01	7.347357814E-01	1.587827117E+00	3.999986533E+00	9.527642943E-05
2	3.756390237E-06	32	5.299192642E-01	7.191855734E-01	1.639602416E+00	3.999985121E+00	4.927170876E-05
4	3.762880064E-06	33	5.446390350E-01	7.033683215E-01	1.695218929E+00	3.999983568E+00	1.020620689E-04
2	3.769774925E-06	34	5.591929035E-01	6.873032967E-01	1.755000964E+00	3.999981859E+00	5.292742899E-05
4	3.777102225E-06	35	5.735764364E-01	6.710100717E-01	1.819308890E+00	3.999979975E+00	1.099469001E-04
2	3.784891967E-06	36	5.877852523E-01	6.545084972E-01	1.888543820E+00	3.999977897E+00	5.718315869E-05
4	3.793177044E-06	37	6.018150232E-01	6.378186779E-01	1.963153011E+00	3.999975601E+00	1.191446642E-04
2	3.801993564E-06	38	6.156614753E-01	6.209609478E-01	2.043636109E+00	3.999973060E+00	6.215871202E-05
4	3.811381218E-06	39	6.293203910E-01	6.039558454E-01	2.130552383E+00	3.999970244E+00	1.299245909E-04
2	3.821383705E-06	40	6.427876097E-01	5.868240888E-01	2.224529146E+00	3.999967118E+00	6.800567639E-05
4	3.832049212E-06	41	6.560590290E-01	5.695865503E-01	2.326271560E+00	3.999963641E+00	1.426288971E-04
2	3.843430966E-06	42	6.691306064E-01	5.522642316E-01	2.436574112E+00	3.999959768E+00	7.491768161E-05
4	3.855587861E-06	43	6.819983601E-01	5.348782369E-01	2.556334072E+00	3.999955445E+00	1.576969733E-04
2	3.868585187E-06	44	6.946583705E-01	5.174497484E-01	2.686567334E+00	3.999950609E+00	8.314469009E-05
4	3.882495461E-06	45	7.071067812E-01	5.000000000E-01	2.828427125E+00	3.999945189E+00	1.756992800E-04
2	3.897399392E-06	46	7.193398003E-01	4.825502516E-01	2.983226171E+00	3.999939099E+00	9.301317476E-05
4	3.913386999E-06	47	7.313537016E-01	4.651217631E-01	3.152463079E+00	3.999932242E+00	1.973855848E-04
2	3.930558903E-06	48	7.431448255E-01	4.477357684E-01	3.337853831E+00	3.999924501E+00	1.049550677E-04
4	3.949027845E-06	49	7.547095802E-01	4.304134495E-01	3.541369556E+00	3.999915739E+00	2.237547582E-04
2	3.968920441E-06	50	7.660444431E-01	4.131759112E-01	3.765282014E+00	3.999905794E+00	1.195500224E-04
4	3.990379258E-06	51	7.771459615E-01	3.960441546E-01	4.012218614E+00	3.999894475E+00	2.561576250E-04
2	4.013565238E-06	52	7.880107536E-01	3.790390522E-01	4.285229282E+00	3.999881550E+00	1.375883038E-04

Table 2.47 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 3, Катамаран NPL, МКК, усвоерш формула Ньюмена, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.3$ - продолжение.

4	4.038660574E-06	53	7.986355100E-01	3.621813221E-01	4.587868120E+00	3.999866745E+00	2.964515972E-04
2	4.065872097E-06	54	8.090169944E-01	3.454915028E-01	4.924293659E+00	3.999849728E+00	1.601663682E-04
4	4.095435315E-06	55	8.191520443E-01	3.289899283E-01	5.299392612E+00	3.999830097E+00	3.472383646E-04
2	4.127619211E-06	56	8.290375726E-01	3.126967033E-01	5.718933349E+00	3.999807364E+00	1.888355435E-04
4	4.162731996E-06	57	8.386705679E-01	2.966316783E-01	6.189758519E+00	3.999780930E+00	4.122383149E-04
2	4.201128001E-06	58	8.480480962E-01	2.808144266E-01	6.720024814E+00	3.999750060E+00	2.258393628E-04
4	4.243215989E-06	59	8.571673007E-01	2.652642186E-01	7.319509720E+00	3.999713842E+00	4.968966205E-04
2	4.289469189E-06	60	8.660254038E-01	2.500000000E-01	8.000000000E+00	3.999671140E+00	2.745034579E-04
4	4.340437470E-06	61	8.746197071E-01	2.350403679E-01	8.775791828E+00	3.999620526E+00	6.093945930E-04
2	4.396762135E-06	62	8.829475929E-01	2.204035483E-01	9.664338369E+00	3.999560196E+00	3.398969999E-04
4	4.459193959E-06	63	8.910065242E-01	2.061073739E-01	1.068709587E+01	3.999487849E+00	7.623957058E-04
2	4.528615211E-06	64	8.987940463E-01	1.921692623E-01	1.187063948E+01	3.999400522E+00	4.299960153E-04
4	4.606066569E-06	65	9.063077870E-01	1.786061952E-01	1.324814955E+01	3.999294373E+00	9.761775049E-04
2	4.692779989E-06	66	9.135454576E-01	1.654346968E-01	1.486141289E+01	3.999164360E+00	5.578141708E-04
4	4.790218731E-06	67	9.205048535E-01	1.526708148E-01	1.676354888E+01	3.999003801E+00	1.284497070E-03
2	4.900125781E-06	68	9.271838546E-01	1.403300998E-01	1.902276964E+01	3.998803731E+00	7.454886935E-04
4	5.024581732E-06	69	9.335804265E-01	1.284275873E-01	2.172763788E+01	3.998551973E+00	1.746124340E-03
2	5.166072495E-06	70	9.396926208E-01	1.169777784E-01	2.499452836E+01	3.998231753E+00	1.032531719E-03
4	5.327565442E-06	71	9.455185756E-01	1.059946232E-01	2.897838960E+01	3.997819603E+00	2.468801796E-03
2	5.512588739E-06	72	9.510565163E-01	9.549150281E-02	3.388854382E+01	3.997282141E+00	1.493493374E-03
4	5.725300468E-06	73	9.563047560E-01	8.548121372E-02	4.001234272E+01	3.996570986E+00	3.662180841E-03
2	5.970517742E-06	74	9.612616959E-01	7.597595192E-02	4.775136325E+01	3.995614548E+00	2.278302304E-03
4	6.253643434E-06	75	9.659258263E-01	6.698729811E-02	5.767814816E+01	3.994304412E+00	5.762959600E-03
2	6.580364292E-06	76	9.702957263E-01	5.852620357E-02	7.062760340E+01	3.992472045E+00	3.711045560E-03
4	6.955871276E-06	77	9.743700648E-01	5.060297685E-02	8.784881363E+01	3.989847568E+00	9.752225444E-03

Таблица 2.48 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усoверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.9$, $2p/L = 0.5$

MC	I^2	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_τ	fR_w
1	2.620499546E-06	4.743115128E-06	0	0.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00	4.000000000E+00	2.945445869E-05
4	1.998194365E-06	2.392683533E-06	1	1.745240644E-02	9.996954135E-01	1.000457054E+00	3.999999965E+00	7.028615562E-05
2	3.724283535E-06	5.066171280E-09	2	3.489949670E-02	9.987820251E-01	1.001829748E+00	3.999999858E+00	2.988938674E-05
4	3.724675485E-06	5.073699283E-09	3	5.233595624E-02	9.972609477E-01	1.004122691E+00	3.999999680E+00	5.992200778E-05
2	3.725225542E-06	5.084263229E-09	4	6.975647374E-02	9.951340344E-01	1.007343597E+00	3.999999430E+00	3.006162530E-05
4	3.725935043E-06	5.097888004E-09	5	8.715574275E-02	9.924038765E-01	1.011503342E+00	3.999999105E+00	6.038322293E-05
2	3.726805715E-06	5.114605817E-09	6	1.045284633E-01	9.890738004E-01	1.016616029E+00	3.999998704E+00	3.035143031E-05
4	3.727839691E-06	5.134456356E-09	7	1.218693434E-01	9.851478631E-01	1.022699092E+00	3.999998224E+00	6.108332123E-05
2	3.729039514E-06	5.157486988E-09	8	1.391731010E-01	9.806308480E-01	1.029773410E+00	3.999997663E+00	3.076299627E-05
4	3.730408157E-06	5.183752997E-09	9	1.564344650E-01	9.755282581E-01	1.037863452E+00	3.999997016E+00	6.203250278E-05
2	3.731949032E-06	5.213317863E-09	10	1.736481777E-01	9.698463104E-01	1.046997448E+00	3.999996280E+00	3.130236643E-05
4	3.733666014E-06	5.246253589E-09	11	1.908089954E-01	9.635919273E-01	1.057207586E+00	3.999995450E+00	6.324483064E-05
2	3.735563459E-06	5.282641067E-09	12	2.079116908E-01	9.567727288E-01	1.068530241E+00	3.999994521E+00	3.197761369E-05
4	3.737646228E-06	5.322570508E-09	13	2.249510543E-01	9.493970231E-01	1.081006242E+00	3.999993486E+00	6.473865670E-05
2	3.739919714E-06	5.366141910E-09	14	2.419218956E-01	9.414737964E-01	1.094681162E+00	3.999992339E+00	3.279908815E-05
4	3.742389872E-06	5.413465599E-09	15	2.588190451E-01	9.330127019E-01	1.109605666E+00	3.999991071E+00	6.653719256E-05
2	3.745063253E-06	5.464662824E-09	16	2.756373558E-01	9.240240481E-01	1.125835889E+00	3.999989675E+00	3.377974426E-05
4	3.747947045E-06	5.519866424E-09	17	2.923717047E-01	9.145187863E-01	1.143433872E+00	3.999988141E+00	6.866925564E-05
2	3.751049107E-06	5.579221574E-09	18	3.090169944E-01	9.045084972E-01	1.162468045E+00	3.999986457E+00	3.493556482E-05
4	3.754378025E-06	5.642886604E-09	19	3.255681545E-01	8.940053768E-01	1.183013781E+00	3.999984612E+00	7.117023111E-05
2	3.757943160E-06	5.711033922E-09	20	3.420201433E-01	8.83022216E-01	1.205154011E+00	3.999982592E+00	3.628610568E-05
4	3.761754704E-06	5.783851023E-09	21	3.583679495E-01	8.715724127E-01	1.228979919E+00	3.999980383E+00	7.408330436E-05
2	3.765823751E-06	5.861541620E-09	22	3.746065934E-01	8.596699002E-01	1.254591725E+00	3.999977967E+00	3.785519273E-05
4	3.770162362E-06	5.944326889E-09	23	3.907311285E-01	8.473291852E-01	1.282099562E+00	3.999975327E+00	7.746103790E-05
2	3.774783649E-06	6.032446851E-09	24	4.067366431E-01	8.345653032E-01	1.311624476E+00	3.999972440E+00	3.967181410E-05
4	3.779701863E-06	6.126161911E-09	25	4.226182617E-01	8.213938048E-01	1.343299538E+00	3.999969283E+00	8.136739178E-05

Таблица 2.48 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усередш. формула Мичеля-Виглея, $Fn = 0.9$, $2p/L = 0.5$ – продолжение.

2	3.784932493E-06	6.225754553E-09	26	4.383711468E-01	8.078307377E-01	1.377271115E+00	3.999965832E+00	4.177126514E-05
4	3.790492375E-06	6.562995200E-09	27	4.539904997E-01	7.938926261E-01	1.413700292E+00	3.999962056E+00	8.588555787E-05
2	3.796399818E-06	6.443824473E-09	28	4.694715628E-01	7.795964517E-01	1.452764502E+00	3.999957922E+00	4.419662506E-05
4	3.802674737E-06	6.562995200E-09	29	4.848096202E-01	7.649596321E-01	1.494659352E+00	3.999953394E+00	9.109514339E-05
2	3.809338810E-06	6.689435332E-09	30	5.000000000E-01	7.500000000E-01	1.539600718E+00	3.999948430E+00	4.700067264E-05
4	3.816415647E-06	6.823570679E-09	31	5.150380749E-01	7.347357814E-01	1.587827117E+00	3.999942984E+00	9.712890195E-05
2	3.823930984E-06	6.965864160E-09	32	5.299192642E-01	7.191855734E-01	1.639602416E+00	3.999937004E+00	5.024839043E-05
4	3.831912899E-06	7.116819412E-09	33	5.446390350E-01	7.033683215E-01	1.695218929E+00	3.999930429E+00	1.041261225E-04
2	3.840392055E-06	7.276984813E-09	34	5.591929035E-01	6.873032967E-01	1.755000964E+00	3.999923193E+00	5.402026569E-05
4	3.849401970E-06	7.446957992E-09	35	5.735764364E-01	6.710100717E-01	1.819308890E+00	3.999915219E+00	1.122664131E-04
2	3.858979331E-06	7.627390892E-09	36	5.877852523E-01	6.545084972E-01	1.888543820E+00	3.999906420E+00	5.841668314E-05
4	3.869164335E-06	7.818995444E-09	37	6.018150232E-01	6.378186779E-01	1.963153011E+00	3.999896698E+00	1.217746390E-04
2	3.880001092E-06	8.238906337E-09	38	6.156614753E-01	6.209609478E-01	2.043636109E+00	3.999885941E+00	6.356736862E-05
4	3.891538065E-06	8.238906337E-09	39	6.293203910E-01	6.039558454E-01	2.130552383E+00	3.999874018E+00	1.329346790E-04
2	3.903828583E-06	8.468998175E-09	40	6.427876097E-01	5.868240888E-01	2.224529146E+00	3.999860783E+00	6.962173676E-05
4	3.916931418E-06	8.713849970E-09	41	6.560590290E-01	5.695865505E-01	2.326271560E+00	3.999846064E+00	1.461082480E-04
2	3.930911447E-06	8.974587520E-09	42	6.691306064E-01	5.522642316E-01	2.436574112E+00	3.999829666E+00	7.679532417E-05
4	3.945840412E-06	9.252449733E-09	43	6.819983601E-01	5.348782369E-01	2.556334072E+00	3.999811362E+00	1.617609893E-04
2	3.961797783E-06	9.548802047E-09	44	6.946583705E-01	5.174497484E-01	2.686567334E+00	3.999790888E+00	8.534985792E-05
4	3.978871759E-06	9.865151722E-09	45	7.071067812E-01	5.000000000E-01	2.828427125E+00	3.999767940E+00	1.804991544E-04
2	3.997160417E-06	1.020316529E-08	46	7.193398003E-01	4.825502516E-01	2.983226171E+00	3.999742158E+00	9.563281040E-05
4	4.016773044E-06	1.056468848E-08	47	7.313537016E-01	4.651217631E-01	3.152463079E+00	3.999713126E+00	2.031219675E-04
2	4.037831674E-06	1.095176913E-08	48	7.431448255E-01	4.477375684E-01	3.337853831E+00	3.999680353E+00	1.081053390E-04
4	4.060472879E-06	1.136668336E-08	49	7.547095802E-01	4.304134495E-01	3.541369556E+00	3.999643258E+00	2.306976419E-04
2	4.084849850E-06	1.181196581E-08	50	7.660444431E-01	4.131759112E-01	3.765282014E+00	3.999601156E+00	1.233883920E-04
4	4.111134834E-06	1.229044436E-08	51	7.771459615E-01	3.960441546E-01	4.012218614E+00	3.999553233E+00	2.646757731E-04
2	4.139521984E-06	1.280528037E-08	52	7.880107536E-01	3.790390522E-01	4.285229282E+00	3.999498515E+00	1.423315485E-04
4	4.170230706E-06	1.3360001510E-08	53	7.986355100E-01	3.621813221E-01	4.587868120E+00	3.999435838E+00	3.070568863E-04

Таблица 2.48 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усoверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 0.9$, $2p/L = 0.5$ – продолжение.

2	4.203509607E-06	1.395862361E-08	54	8.090169944E-01	3.454915028E-01	4.924293659E+00	3.999376379E+00	1.661179911E-04
4	4.239641153E-06	1.460557727E-08	55	8.191520443E-01	3.289899283E-01	5.299392612E+00	3.999280688E+00	3.606539118E-04
2	4.278947191E-06	1.530591647E-08	56	8.290375726E-01	3.126967033E-01	5.718933494E+00	3.999184448E+00	1.964283259E-04
4	4.321795505E-06	1.606533533E-08	57	8.386705679E-01	2.966316785E-01	6.189758519E+00	3.999072544E+00	4.295053674E-04
2	4.368607619E-06	1.689028031E-08	58	8.480480962E-01	2.808144266E-01	6.720024814E+00	3.998941860E+00	2.357028695E-04
4	4.419868121E-06	1.778806529E-08	59	8.571673007E-01	2.652642186E-01	7.319509720E+00	3.998788539E+00	5.195460813E-04
2	4.476135789E-06	1.876700572E-08	60	8.660254038E-01	2.500000000E-01	8.000000000E+00	3.998607773E+00	2.875736521E-04
4	4.538056933E-06	1.983657493E-08	61	8.746197071E-01	2.350403679E-01	8.775791828E+00	3.998393522E+00	6.397289626E-04
2	4.606381350E-06	2.100758593E-08	62	8.829475929E-01	2.204035483E-01	9.664338369E+00	3.998138150E+00	3.575986933E-04
4	4.681981445E-06	2.229240218E-08	63	8.910065242E-01	2.061073739E-01	1.068709587E+01	3.997831919E+00	8.039644086E-04
2	4.765875051E-06	2.370518053E-08	64	8.987940463E-01	1.921692623E-01	1.187063948E+01	3.997462302E+00	4.545544780E-04
4	4.859252562E-06	2.526214912E-08	65	9.063077870E-01	1.786061952E-01	1.324814955E+01	3.997013039E+00	1.034599347E-03
2	4.963508921E-06	2.698192097E-08	66	9.135454576E-01	1.654346968E-01	1.486141289E+01	3.996462810E+00	5.928012826E-04
4	5.080280811E-06	2.888584087E-08	67	9.205048535E-01	1.526708148E-01	1.676354888E+01	3.995783357E+00	1.368919654E-03
2	5.211488866E-06	3.099835702E-08	68	9.271838546E-01	1.403300998E-01	1.902276964E+01	3.994936789E+00	7.968031402E-04
4	5.359383641E-06	3.334739741E-08	69	9.335804265E-01	1.284275873E-01	2.172763788E+01	3.993871640E+00	1.871868643E-03
2	5.526591884E-06	3.596471251E-08	70	9.396926208E-01	1.169777784E-01	2.499452836E+01	3.992517043E+00	1.110187066E-03
4	5.716155451E-06	3.888611277E-08	71	9.455185756E-01	1.059946232E-01	2.897838960E+01	3.990773911E+00	2.662194779E-03
2	5.931547321E-06	4.215147621E-08	72	9.510565163E-01	9.549150281E-02	3.388854382E+01	3.988501374E+00	1.614864065E-03
4	6.176634602E-06	4.580431113E-08	73	9.563047560E-01	8.548121372E-02	4.001234272E+01	3.985495426E+00	3.969144666E-03
2	6.455531701E-06	4.989051333E-08	74	9.612616959E-01	7.597595192E-02	4.775136325E+01	3.981454524E+00	2.473620198E-03
4	6.772238574E-06	5.445572032E-08	75	9.659258263E-01	6.698729811E-02	5.767814816E+01	3.975922651E+00	6.262095431E-03
2	7.129873057E-06	5.954029103E-08	76	9.702957263E-01	5.852620357E-02	7.062760340E+01	3.968192294E+00	4.029866214E-03
4	7.529157893E-06	6.517036398E-08	77	9.743700648E-01	5.060297685E-02	8.784881363E+01	3.957133546E+00	1.056004976E-02
2	7.965580596E-06	7.134260577E-08	78	9.781476007E-01	4.322727118E-02	1.112662033E+02	3.940881795E+00	7.048171966E-03

Таблица 2.48 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $Fn = 0.9$, $2p/L = 0.5$ – продолжение.

4	8.424293426E-06	7.799914097E-08	79	9.816271834E-01	3.640807272E-02	1.439472807E+02	3.916242772E+00	1.917207450E-02
2	8.871461864E-06	8.498793947E-08	80	9.848077530E-01	3.015368961E-02	1.909806249E+02	3.877505251E+00	1.326501045E-02
4	9.240927746E-06	9.200341262E-08	81	9.876883406E-01	2.447174185E-02	2.612177449E+02	3.813946411E+00	3.719249525E-02
2	9.417457872E-06	9.850467410E-08	82	9.902680687E-01	1.936915203E-02	3.709659836E+02	3.704294618E+00	2.615304905E-02
4	9.226707407E-06	1.036236109E-07	83	9.925461516E-01	1.485213686E-02	5.524800320E+02	3.503788647E+00	7.224562136E-02
2	8.463151839E-06	1.061384227E-07	84	9.945218954E-01	1.092619963E-02	8.755809481E+02	3.113262128E+00	4.671827955E-02
4	7.013257677E-06	1.048681684E-07	85	9.961946981E-01	7.596123494E-03	1.510469551E+03	2.314928929E+00	9.955779984E-02
2	5.098797671E-06	1.010138539E-07	86	9.975640503E-01	4.865965629E-03	2.946092948E+03	8.095900256E-01	2.480442656E-02
4	3.450070516E-06	1.082120258E-07	87	9.986295348E-01	2.739052316E-03	6.975888156E+03	5.862195757E-01	5.820499375E-02
1	2.816292690E-06	1.927174169E-07	88	9.993908270E-01	1.217974870E-03	2.352569749E+04	3.338053545E-01	2.362976778E-02
							$\Sigma R_{w,i}$	4.753997639E-01
1	2.816292690E-06	1.927174169E-07	88.00000000000000	9.993908270E-01	1.217974870E-03	2.352569749E+04	3.338053545E-01	2.362976778E-02
4	2.620499546E-06	6.08212E-07	88.88906440000000	9.998120298E-01	3.759049787E-04	1.372090898E+05	1.397310458E-01	2.476081968E-01
1	4.193389402E-09	7.54702E-06	89.77812880000000	9.999925023E-01	1.499527480E-05	1.722139613E+07	1.060016358E+00	1.378471918E+02
							$\Sigma R_{w,i}$	1.381184297E+02
1	2.873458218E-31	1.951822434E-31	89.78348173994900	9.999928598E-01	1.428044447E-05	1.853051174E+07	3.929041004E+00	3.513148861E-23
				$R_w [N] = (4pg^2/\pi U^3) \int A(\theta) ^2$	$4\cos^2[0.5(2p/L)\sin\theta/(En^2\cos^2\theta)]\sec^3\theta d\theta$			7.053
				$R_w [N]$	$\Sigma R_{w,i}$			7.279

Таблица 2.49 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усoверш. формула Мичеля-Виглея, $Fn = 1.0$, $2p/L = 0.5$

MC	I^2	J^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	fR_w
1	3.675170592E-06	4.265179080E-07	0	0.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00	4.000000000E+00	1.640675400E-05
4	3.675234094E-06	3.337174789E-09	1	1.745240644E-02	9.996954135E-01	1.000457054E+00	3.99999977E+00	5.888404084E-05
2	3.675424753E-06	3.340162852E-09	2	3.489949670E-02	9.987820251E-01	1.001829748E+00	3.999999907E+00	2.948396834E-05
4	3.675743031E-06	3.345150805E-09	3	5.233595624E-02	9.972609477E-01	1.004122691E+00	3.999999790E+00	5.910809169E-05
2	3.676189701E-06	3.352150457E-09	4	6.975647374E-02	9.951340344E-01	1.007343597E+00	3.999999626E+00	2.965250063E-05
4	3.676765850E-06	3.361178427E-09	5	8.715574275E-02	9.924038765E-01	1.011503342E+00	3.999999413E+00	5.955936386E-05
2	3.677472884E-06	3.37225621E-09	6	1.045284633E-01	9.890738004E-01	1.016616029E+00	3.999999150E+00	2.993604300E-05
4	3.678312539E-06	3.385410342E-09	7	1.218693434E-01	9.851478631E-01	1.022699092E+00	3.999998835E+00	6.024428887E-05
2	3.679286885E-06	3.400672428E-09	8	1.391731010E-01	9.806308480E-01	1.029773410E+00	3.999998467E+00	3.033865817E-05
4	3.680398341E-06	3.418079406E-09	9	1.564344650E-01	9.755282581E-01	1.037863452E+00	3.999998042E+00	6.117274491E-05
2	3.681649687E-06	3.437673684E-09	10	1.736481777E-01	9.698463104E-01	1.046997448E+00	3.999997560E+00	3.086619766E-05
4	3.683044075E-06	3.459503371E-09	11	1.908089954E-01	9.635919273E-01	1.057207586E+00	3.999997015E+00	6.235834622E-05
2	3.684585051E-06	3.483622529E-09	12	2.079116908E-01	9.567727288E-01	1.068530241E+00	3.999996405E+00	3.152647495E-05
4	3.686276575E-06	3.510091455E-09	13	2.249510543E-01	9.493970231E-01	1.081006242E+00	3.999995726E+00	6.381885047E-05
2	3.688123036E-06	3.538977006E-09	14	2.419218956E-01	9.414737964E-01	1.094681162E+00	3.999994973E+00	3.232950226E-05
4	3.690129284E-06	3.570352960E-09	15	2.588190451E-01	9.330127019E-01	1.109605666E+00	3.999994142E+00	6.557670469E-05
2	3.692300655E-06	3.604300422E-09	16	2.756373558E-01	9.240240481E-01	1.125835889E+00	3.999993226E+00	3.328780316E-05
4	3.694643001E-06	3.640908274E-09	17	2.923717047E-01	9.145187863E-01	1.143433872E+00	3.999992219E+00	6.765975780E-05
2	3.697162725E-06	3.680273682E-09	18	3.090169944E-01	9.045084972E-01	1.162468045E+00	3.999991115E+00	3.441681735E-05
4	3.699866821E-06	3.722502651E-09	19	3.255681545E-01	8.940053768E-01	1.183013781E+00	3.999989904E+00	7.010217842E-05
2	3.702762916E-06	3.767710654E-09	20	3.420201433E-01	8.830222216E-01	1.205154011E+00	3.999988579E+00	3.573541999E-05
4	3.705859315E-06	3.816023313E-09	21	3.583679495E-01	8.715724127E-01	1.228979919E+00	3.999987130E+00	7.294562927E-05
2	3.709165059E-06	3.867577173E-09	22	3.746065934E-01	8.596699002E-01	1.254591725E+00	3.999985545E+00	3.726658547E-05
4	3.712689979E-06	3.922520547E-09	23	3.907311285E-01	8.473291852E-01	1.282099562E+00	3.999983812E+00	7.624076759E-05
2	3.716444765E-06	3.981014459E-09	24	4.067366431E-01	8.345653032E-01	1.311624476E+00	3.999981918E+00	3.903823563E-05
4	3.720441036E-06	4.043233369E-09	25	4.226182617E-01	8.213938048E-01	1.343299538E+00	3.999979847E+00	8.004916470E-05

Таблица 2.49 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усoверш. формула Мичеля-Виглея, $Fn = 1.0$, $2p/L = 0.5$ – продолжение.

2	3.724691424E-06	4.109367941E-09	26	4.383711468E-01	8.078307377E-01	1.377271115E+00	3.99977583E+00	4.108432673E-05
4	3.729209664E-06	4.179623122E-09	27	4.539904997E-01	7.938926261E-01	1.413700292E+00	3.99975105E+00	8.444577084E-05
2	3.734010691E-06	4.254222788E-09	28	4.694715628E-01	7.795964517E-01	1.452764502E+00	3.99972393E+00	4.344624866E-05
4	3.739110759E-06	4.333409737E-09	29	4.848096202E-01	7.649596321E-01	1.494659352E+00	3.99969422E+00	8.952209702E-05
2	3.744527564E-06	4.417447789E-09	30	5.000000000E-01	7.500000000E-01	1.539600718E+00	3.99966166E+00	4.617463688E-05
4	3.750280383E-06	4.506623774E-09	31	5.150380749E-01	7.347357814E-01	1.587827117E+00	3.99962593E+00	9.539034994E-05
2	3.756390237E-06	4.601249750E-09	32	5.299192642E-01	7.191855734E-01	1.639602416E+00	3.99958669E+00	4.933173607E-05
4	3.762880064E-06	4.701665486E-09	33	5.446390350E-01	7.033683215E-01	1.695218929E+00	3.99954355E+00	1.021888477E-04
2	3.769774925E-06	4.808241238E-09	34	5.591929035E-01	6.873032967E-01	1.755000964E+00	3.99949608E+00	5.299450914E-05
4	3.777102225E-06	4.921380870E-09	35	5.735764364E-01	6.710100717E-01	1.819308890E+00	3.99944376E+00	1.100891758E-04
2	3.784891967E-06	5.041525356E-09	36	5.877852523E-01	6.545084972E-01	1.888543820E+00	3.99938603E+00	5.725876491E-05
4	3.793177044E-06	5.169156722E-09	37	6.018150232E-01	6.378186779E-01	1.963153011E+00	3.99932225E+00	1.193057350E-04
2	3.801993564E-06	5.304802488E-09	38	6.156614753E-01	6.209609478E-01	2.043636109E+00	3.99925167E+00	6.224464948E-05
4	3.811381218E-06	5.449040691E-09	39	6.293203910E-01	6.039558454E-01	2.130552383E+00	3.99917345E+00	1.301086203E-04
2	3.821383705E-06	5.602505556E-09	40	6.427876097E-01	5.868240888E-01	2.224529146E+00	3.99908661E+00	6.810438376E-05
4	3.832049212E-06	5.765893933E-09	41	6.560590290E-01	5.695865505E-01	2.326271560E+00	3.998990004E+00	1.428411955E-04
2	3.843430966E-06	5.939972607E-09	42	6.691306064E-01	5.522642316E-01	2.436574112E+00	3.99888246E+00	7.503212426E-05
4	3.855587861E-06	6.125586611E-09	43	6.819983601E-01	5.348782236E-01	2.556334072E+00	3.99876237E+00	1.579443875E-04
2	3.868585187E-06	6.323668710E-09	44	6.946583705E-01	5.174497484E-01	2.686567334E+00	3.99862804E+00	8.327877197E-05
4	3.882495461E-06	6.535250242E-09	45	7.071067812E-01	5.000000000E-01	2.828427125E+00	3.99847748E+00	1.759907402E-04
2	3.897399392E-06	6.761473525E-09	46	7.193398003E-01	4.825502516E-01	2.983226171E+00	3.99830833E+00	9.317201838E-05
4	3.913386999E-06	7.003606109E-09	47	7.313537016E-01	4.651217631E-01	3.152463079E+00	3.99811785E+00	1.977328817E-04
2	3.930558903E-06	7.263057168E-09	48	7.431448255E-01	4.477357684E-01	3.337853831E+00	3.99790282E+00	1.051454799E-04
4	3.949027845E-06	7.541396402E-09	49	7.547095802E-01	4.304134495E-01	3.541369556E+00	3.99765944E+00	2.241736637E-04
2	3.968920441E-06	7.840375891E-09	50	7.660444431E-01	4.131759112E-01	3.765282014E+00	3.99738321E+00	1.197811713E-04
4	3.990379258E-06	8.161955417E-09	51	7.771459615E-01	3.960441546E-01	4.012218614E+00	3.99706879E+00	2.566695336E-04
2	4.013565238E-06	8.508331881E-09	52	7.880107536E-01	3.790390522E-01	4.285229282E+00	3.99670979E+00	1.378727178E-04
4	4.038660574E-06	8.881973557E-09	53	7.986355100E-01	3.621813221E-01	4.587868120E+00	3.99629855E+00	2.970859689E-04

Таблица 2.49 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $F_n = 1.0$, $2p/L = 0.5$ – продолжение.

2	4.065872097E-06	9.285660076E-09	54	8.090169944E-01	3.454915028E-01	4.924293659E+00	3.99582588E+00	1.605214354E-04
4	4.095435315E-06	9.722529228E-09	55	8.191520443E-01	3.289899283E-01	5.299392612E+00	3.99528060E+00	3.480364225E-04
2	4.127619211E-06	1.019613185E-08	56	8.290375726E-01	3.126967033E-01	5.718933494E+00	3.999464916E+00	1.892858017E-04
4	4.162731996E-06	1.071049638E-08	57	8.386705679E-01	2.966316785E-01	6.189758519E+00	3.999391493E+00	4.132587423E-04
2	4.201128001E-06	1.127020492E-08	58	8.480480962E-01	2.808144266E-01	6.720024814E+00	3.999305749E+00	2.264200588E-04
4	4.243215989E-06	1.188048305E-08	59	8.571673007E-01	2.652642186E-01	7.319509720E+00	3.999205151E+00	4.982244967E-04
2	4.289469189E-06	1.254730610E-08	60	8.660254038E-01	2.500000000E-01	8.000000000E+00	3.999086544E+00	2.752661804E-04
4	4.340437470E-06	1.327752500E-08	61	8.746197071E-01	2.350403679E-01	8.775791828E+00	3.998945965E+00	6.111556563E-04
2	4.396762135E-06	1.407901562E-08	62	8.829475929E-01	2.204035483E-01	9.664338369E+00	3.998778403E+00	3.409187428E-04
4	4.459193959E-06	1.496085576E-08	63	8.910065242E-01	2.061073739E-01	1.068709587E+01	3.998577465E+00	7.647794653E-04
2	4.528615211E-06	1.593353507E-08	64	8.987940463E-01	1.921692623E-01	1.187063948E+01	3.998334932E+00	4.313939484E-04
4	4.606066569E-06	1.700920328E-08	65	9.063077870E-01	1.786061952E-01	1.324814955E+01	3.998040131E+00	9.794750410E-04
2	4.692779989E-06	1.820196268E-08	66	9.135454576E-01	1.654346968E-01	1.486141289E+01	3.997679066E+00	5.597697974E-04
4	4.790218731E-06	1.952821031E-08	67	9.205048535E-01	1.526708148E-01	1.676354888E+01	3.997233188E+00	1.289162512E-03
2	4.900125781E-06	2.100703380E-08	68	9.271838546E-01	1.403300998E-01	1.902276964E+01	3.996677619E+00	7.482865673E-04
4	5.024581732E-06	2.266066097E-08	69	9.335804265E-01	1.284275873E-01	2.172763788E+01	3.995978567E+00	1.752870444E-03
2	5.166072495E-06	2.451495522E-08	70	9.396926208E-01	1.169777784E-01	2.499452836E+01	3.995089488E+00	1.036616139E-03
4	5.327565442E-06	2.659993310E-08	71	9.455185756E-01	1.059946232E-01	2.897838960E+01	3.993945297E+00	2.478723772E-03
2	5.512588739E-06	2.895025164E-08	72	9.510565163E-01	9.549150281E-02	3.388854382E+01	3.992453431E+00	1.499523084E-03
4	5.725300468E-06	3.160556059E-08	73	9.563047560E-01	8.548121372E-02	4.001234272E+01	3.990479800E+00	3.676784943E-03
2	5.970517742E-06	3.461052213E-08	74	9.612616959E-01	7.597595192E-02	4.775136325E+01	3.987826106E+00	2.287042686E-03
4	6.253643434E-06	3.801413768E-08	75	9.659258263E-01	6.698729811E-02	5.767814816E+01	3.984192276E+00	5.783312589E-03
2	6.580364292E-06	4.186774092E-08	76	9.702957263E-01	5.852620357E-02	7.062760340E+01	3.979112341E+00	3.722160188E-03
4	6.955871276E-06	4.622053917E-08	77	9.743700648E-01	5.060297685E-02	8.784881363E+01	3.971841233E+00	9.772722645E-03
2	7.383121398E-06	5.111079674E-08	78	9.781476007E-01	4.322727118E-02	1.112662033E+02	3.961147263E+00	6.553154008E-03

Таблица 2.49 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 4, Катамаран NPL, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $Fn = 1.0$, $2p/L = 0.5$ – продолжение.

4	7.859243849E-06	5.654950688E-08	79	9.816271834E-01	3.640807272E-02	1.439472807E+02	3.944914960E+00	1.798024273E-02
2	8.368513998E-06	6.249157740E-08	80	9.848077530E-01	3.015368961E-02	1.909806249E+02	3.919346934E+00	1.262154123E-02
4	8.869468266E-06	6.878732226E-08	81	9.876883406E-01	2.447174185E-02	2.612177449E+02	3.877268207E+00	3.621106353E-02
2	9.273645907E-06	7.510558562E-08	82	9.902680687E-01	1.936915203E-02	3.709659836E+02	3.804291168E+00	2.638708696E-02
4	9.417914236E-06	8.082369215E-08	83	9.925461516E-01	1.485213686E-02	5.524800320E+02	3.669536456E+00	7.702889887E-02
2	9.051775758E-06	8.490682979E-08	84	9.945218954E-01	1.092619963E-02	8.755809481E+02	3.401749996E+00	5.442735499E-02
4	7.909445952E-06	8.594048505E-08	85	9.961946981E-01	7.596123494E-03	1.510469551E+03	2.827452793E+00	1.365861892E-01
2	5.979909641E-06	8.320602071E-08	86	9.975640503E-01	4.865965629E-03	2.946092948E+03	1.567600620E+00	5.600253936E-02
4	1.967296949E-05	8.303128772E-08	87	9.986295348E-01	2.739052316E-03	6.975888156E+03	1.558646872E-03	8.592237389E-04
1	2.885470384E-06	1.290050682E-07	88	9.993908270E-01	1.217974870E-03	2.352569749E+04	3.280375775E+00	2.326365004E-01
							ΣR_{w1}	7.016259218E-01
1	2.885470384E-06	1.290050682E-07	88.00000000000000	9.993908270E-01	1.217974870E-03	2.352569749E+04	3.280375775E+00	2.326365004E-01
4	2.698011786E-06	4.265179080E-07	88.9209991935000	9.998226809E-01	3.546066964E-04	1.497544034E+05	3.723455099E+00	6.968998482E+00
1	8.664495272E-08	7.689328858E-06	89.8419983870000	9.999961977E-01	7.604605258E-06	4.768535134E+07	4.163233266E-01	1.543727075E+02
							ΣR_{w2}	1.615743424E+02
1	7.250844857E-32	1.414096018E-32	89.91856206316720	9.999989899E-01	2.020263269E-06	3.482475326E+08	7.671653691E-01	2.314955471E-23
				R_w [N] = $(4\rho g^2/\pi U^2) \int A(\theta) ^2 4\cos^2[0.5(2p/L)\sin\theta/(Fn^2\cos^2\theta)]\sec^3\theta d\theta$				
				Экспериментальный R_w [N]				
				7.681				
				7.929				

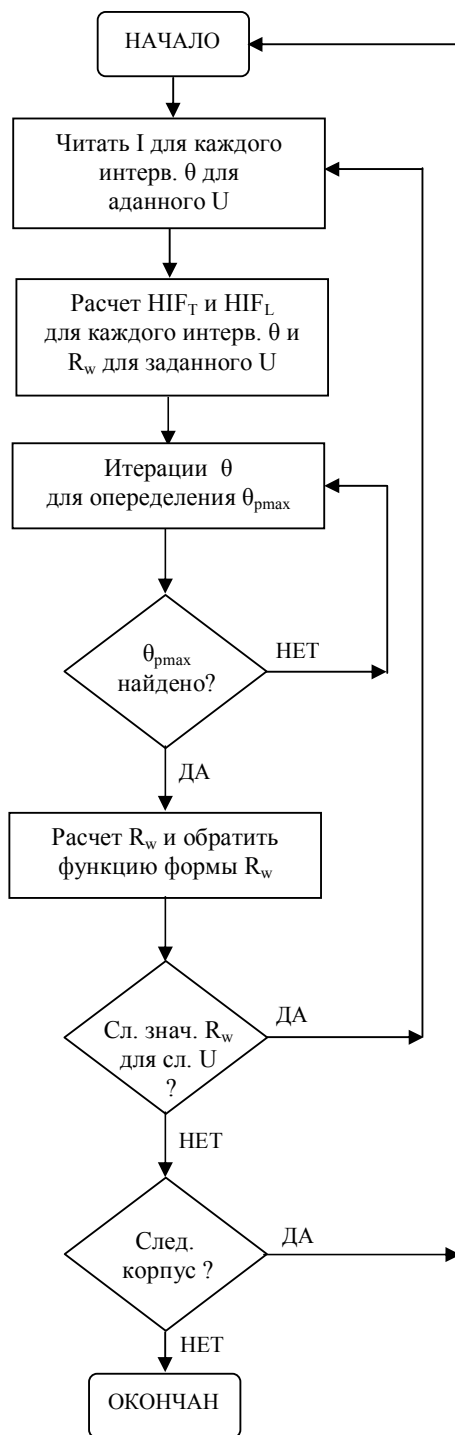


Рис. 3.3 – Блок-схема расчетных процедур
(Теоретические расчеты для тримаран)

Table 3.14 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 1, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{nCH} = 0.424$, $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м

MC	I_{SH}^2	I_{CH}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	$\frac{HIF_{TCH}}{HIF_{TSH}} =$	rR_w
1	1.62408157E-06	2.868690756E-06	0	0.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00	4.495098913E-06
4	1.626318293E-06	2.868475487E-06	1	1.745240644E-02	9.96954135E-01	1.000457054E+00	9.999999666E-01	1.798739197E-05
2	1.626048521E-06	2.867829272E-06	2	3.489949670E-02	9.987820251E-01	1.001829748E+00	9.999998662E-01	9.004199707E-06
4	1.625598291E-06	2.866750893E-06	3	5.233595624E-02	9.972609477E-01	1.004122691E+00	9.999996981E-01	1.804347355E-05
2	1.624966685E-06	2.8652338309E-06	4	6.975647374E-02	9.951340344E-01	1.007343597E+00	9.999994615E-01	9.046335631E-06
4	1.624152414E-06	2.863288659E-06	5	8.715574275E-02	9.924038765E-01	1.011503342E+00	9.99991547E-01	1.815623122E-05
2	1.623153812E-06	2.860898244E-06	6	1.045284633E-01	9.890738004E-01	1.016616029E+00	9.99987759E-01	9.117107233E-06
4	1.621968829E-06	2.858062519E-06	7	1.218693434E-01	9.851478631E-01	1.022699092E+00	9.99983227E-01	1.832686523E-05
2	1.620595023E-06	2.854776073E-06	8	1.391731010E-01	9.806308480E-01	1.029773410E+00	9.99977924E-01	9.217215963E-06
4	1.619029550E-06	2.851032615E-06	9	1.564344650E-01	9.755282581E-01	1.037863452E+00	9.99971816E-01	1.855720430E-05
2	1.617269154E-06	2.846824950E-06	10	1.736481777E-01	9.698463104E-01	1.046997448E+00	9.99964864E-01	9.347757424E-06
4	1.615310152E-06	2.842144954E-06	11	1.908089954E-01	9.635919273E-01	1.057207586E+00	9.99957024E-01	1.884974039E-05
2	1.613148420E-06	2.836983545E-06	12	2.079116908E-01	9.567727288E-01	1.068530241E+00	9.99948244E-01	9.510151945E-06
4	1.61079377E-06	2.831330653E-06	13	2.249510543E-01	9.493970231E-01	1.081006242E+00	9.99938468E-01	1.920767648E-05
2	1.608197964E-06	2.825175184E-06	14	2.419218956E-01	9.414737964E-01	1.094681162E+00	9.99927631E-01	9.706189894E-06
4	1.605398626E-06	2.818504979E-06	15	2.588190451E-01	9.330127019E-01	1.109605666E+00	9.99915660E-01	1.963498842E-05
2	1.602375288E-06	2.811306778E-06	16	2.756373558E-01	9.240240481E-01	1.125835889E+00	9.99902473E-01	9.938066423E-06
4	1.599121326E-06	2.803566165E-06	17	2.923717047E-01	9.145187863E-01	1.143433872E+00	9.99887978E-01	2.013650244E-05
2	1.595629544E-06	2.795267523E-06	18	3.090169944E-01	9.045084972E-01	1.162468045E+00	9.99872075E-01	1.020842446E-05
4	1.591892142E-06	2.786393976E-06	19	3.255681545E-01	8.940053768E-01	1.183013781E+00	9.99854648E-01	2.071799012E-05
2	1.587900681E-06	2.776927335E-06	20	3.420201433E-01	8.830222216E-01	1.205154011E+00	9.99835572E-01	1.052040700E-05
4	1.583646048E-06	2.766848024E-06	21	3.583679495E-01	8.715724127E-01	1.228979919E+00	9.99814704E-01	2.138628313E-05
2	1.579118416E-06	2.756135023E-06	22	3.746065934E-01	8.596699002E-01	1.254591725E+00	9.99791885E-01	1.087771979E-05
4	1.574307200E-06	2.744765784E-06	23	3.907311285E-01	8.473291852E-01	1.282099562E+00	9.99766941E-01	2.214941010E-05
2	1.569201011E-06	2.732716161E-06	24	4.067366431E-01	8.345653032E-01	1.311624476E+00	9.99739672E-01	1.128470593E-05

Таблица 3.14 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 1, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{нСН} = 0.424$, $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м – продолжение.

4	1.563787605E-06	2.719960317E-06	25	4.226182617E-01	8.213938048E-01	1.343299538E+00	9.999709800E-01	2.301675860E-05
2	1.558053828E-06	2.706470644E-06	26	4.383711468E-01	8.078307377E-01	1.377271115E+00	9.99677257E-01	1.174643363E-05
4	1.551985556E-06	2.692217662E-06	27	4.539904997E-01	7.938926261E-01	1.413700292E+00	9.99641588E-01	2.399926513E-05
2	1.545567632E-06	2.677169923E-06	28	4.694715628E-01	7.795964517E-01	1.452764502E+00	9.99602542E-01	1.226879878E-05
4	1.538783792E-06	2.661293901E-06	29	4.848096202E-01	7.649596321E-01	1.494659352E+00	9.99559773E-01	2.510963617E-05
2	1.531616597E-06	2.644553891E-06	30	5.000000000E-01	7.500000000E-01	1.539600718E+00	9.999512888E-01	1.285864377E-05
4	1.524047347E-06	2.626911884E-06	31	5.150380749E-01	7.347357814E-01	1.587827117E+00	9.99461449E-01	2.636260267E-05
2	1.516055994E-06	2.608327457E-06	32	5.299192642E-01	7.191855734E-01	1.639602416E+00	9.99404959E-01	1.352389336E-05
4	1.507621053E-06	2.588757646E-06	33	5.446390350E-01	7.033683215E-01	1.695218929E+00	9.99342856E-01	2.777520949E-05
2	1.498719498E-06	2.568156825E-06	34	5.591929035E-01	6.873032967E-01	1.755000964E+00	9.999274506E-01	1.427370811E-05
4	1.489326658E-06	2.546476579E-06	35	5.735764364E-01	6.710100717E-01	1.819308890E+00	9.999199187E-01	2.936713888E-05
2	1.479416101E-06	2.523665580E-06	36	5.877852523E-01	6.545084972E-01	1.888543820E+00	9.999116082E-01	1.511865386E-05
4	1.468959516E-06	2.499669466E-06	37	6.018150232E-01	6.378186779E-01	1.963153011E+00	9.999024257E-01	3.116106293E-05
2	1.457926584E-06	2.474430726E-06	38	6.156614753E-01	6.209609478E-01	2.043636109E+00	9.998922647E-01	1.607088320E-05
4	1.446284841E-06	2.447888597E-06	39	6.293203910E-01	6.039558454E-01	2.130552383E+00	9.998810035E-01	3.318301286E-05
2	1.433999543E-06	2.419978968E-06	40	6.427876097E-01	5.868240888E-01	2.224529146E+00	9.998685023E-01	1.714432032E-05
4	1.421033517E-06	2.390634314E-06	41	6.560590290E-01	5.695865505E-01	2.326271560E+00	9.998546003E-01	3.546274087E-05
2	1.407347011E-06	2.359783654E-06	42	6.691306064E-01	5.522642316E-01	2.436574112E+00	9.998391123E-01	1.835483257E-05
4	1.392897544E-06	2.327352544E-06	43	6.819983601E-01	5.348782369E-01	2.556334072E+00	9.998218240E-01	3.803403026E-05
2	1.377639750E-06	2.293263121E-06	44	6.946583705E-01	5.174497484E-01	2.686567334E+00	9.998024870E-01	1.972035968E-05
4	1.361525239E-06	2.257434207E-06	45	7.071067812E-01	5.000000000E-01	2.828427125E+00	9.997808122E-01	4.093487785E-05
2	1.344502448E-06	2.219781500E-06	46	7.193398003E-01	4.825502516E-01	2.983226171E+00	9.997564625E-01	2.126095121E-05
4	1.326516525E-06	2.180217851E-06	47	7.313337016E-01	4.651217631E-01	3.152463079E+00	9.997290429E-01	4.420742104E-05
2	1.307509223E-06	2.138653685E-06	48	7.431448255E-01	4.477357684E-01	3.337853831E+00	9.996980898E-01	2.299863051E-05
4	1.287418834E-06	2.094997561E-06	49	7.547095802E-01	4.304134495E-01	3.541369556E+00	9.996630563E-01	4.789740162E-05
2	1.266180172E-06	2.049156940E-06	50	7.660444431E-01	4.131759112E-01	3.765282014E+00	9.996232949E-01	2.495695344E-05
4	1.243724612E-06	2.001039182E-06	51	7.771459615E-01	3.960441546E-01	4.01218614E+00	9.995780364E-01	5.205283310E-05

Таблица 3.14 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна $R_w [N]$, Исследование 1, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{nCH} = 0.424$, $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м – продолжение

2	1.219980228E-06	1.950552839E-06	52	7.880107536E-01	3.790390522E-01	4.28529282E+00	9.995263627E-01	2.716005217E-05
4	1.194872039E-06	1.897609297E-06	53	7.986355100E-01	3.621813221E-01	4.587868120E+00	9.994671732E-01	5.672134735E-05
2	1.168322411E-06	1.842124842E-06	54	8.090169944E-01	3.454915028E-01	4.924293659E+00	9.993991423E-01	2.963083802E-05
4	1.140251653E-06	1.784023242E-06	55	8.191520443E-01	3.289899283E-01	5.299392612E+00	9.993206657E-01	6.194541285E-05
2	1.110578873E-06	1.723238921E-06	56	8.290375726E-01	3.126967033E-01	5.718933494E+00	9.992297914E-01	3.238786635E-05
4	1.079223148E-06	1.659720842E-06	57	8.386705679E-01	2.966316785E-01	6.189758519E+00	9.991241313E-01	6.775421176E-05
2	1.046105111E-06	1.593437209E-06	58	8.480480962E-01	2.808144266E-01	6.720024814E+00	9.990007469E-01	3.544013069E-05
4	1.011149049E-06	1.524381088E-06	59	8.571673007E-01	2.652642186E-01	7.319509720E+00	9.988559994E-01	7.415042466E-05
2	9.742856288E-07	1.452577067E-06	60	8.660254038E-01	2.500000000E-01	8.000000000E+00	9.986853337E-01	3.877875567E-05
4	9.354554098E-07	1.378089019E-06	61	8.746197071E-01	2.350403679E-01	8.775791828E+00	9.984831174E-01	8.108954696E-05
2	8.946132956E-07	1.301029019E-06	62	8.829475929E-01	2.204035483E-01	9.664338369E+00	9.982420920E-01	4.236425693E-05
4	8.517341039E-07	1.221567364E-06	63	8.910065242E-01	2.061073739E-01	1.068709587E+01	9.979531017E-01	8.844886908E-05
2	8.068194390E-07	1.139943526E-06	64	8.987940463E-01	1.921692623E-01	1.187063948E+01	9.976043492E-01	4.610791889E-05
4	7.599060275E-07	1.056477696E-06	65	9.063077870E-01	1.786061952E-01	1.324814955E+01	9.971805273E-01	9.598350474E-05
2	7.110756285E-07	9.715823024E-07	66	9.135454576E-01	1.654346968E-01	1.486141289E+01	9.966615772E-01	4.984638282E-05
4	6.604665175E-07	8.857725259E-07	67	9.205048335E-01	1.526708148E-01	1.676354888E+01	9.960209322E-01	1.032692581E-04
2	6.082863435E-07	7.996743954E-07	68	9.271838546E-01	1.403300998E-01	1.902276964E+01	9.952229984E-01	5.331073774E-05
4	5.548258366E-07	7.140285163E-07	69	9.335804265E-01	1.284275873E-01	2.172763788E+01	9.942194877E-01	1.096393750E-04
2	5.004723474E-07	6.296869286E-07	70	9.396926208E-01	1.169777784E-01	2.499452836E+01	9.929439951E-01	5.609696293E-05
4	4.457215081E-07	5.476001589E-07	71	9.455185756E-01	1.059946232E-01	2.897838960E+01	9.913038380E-01	1.141381778E-04
2	3.911843986E-07	4.687914211E-07	72	9.510565163E-01	9.549150281E-02	3.388854382E+01	9.891675457E-01	5.765526895E-05
4	3.375865707E-07	3.943154712E-07	73	9.563047560E-01	8.548121372E-02	4.001234272E+01	9.863452840E-01	1.155409416E-04
2	2.857543545E-07	3.252012467E-07	74	9.612616959E-01	7.597595192E-02	4.775136325E+01	9.825575411E-01	5.733019440E-05
4	2.365835263E-07	2.623804645E-07	75	9.659258263E-01	6.698729811E-02	5.767814816E+01	9.773838223E-01	1.125137632E-04
2	1.909864580E-07	2.066088360E-07	76	9.702957263E-01	5.852620357E-02	7.062760340E+01	9.701763901E-01	5.448743981E-05

Таблица 3.14 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 1, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{nCH} = 0.424$, $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м – продолжение

4	1.498173200E-07	1.583917202E-07	77	9.743700648E-01	5.060297685E-02	8.784881363E+01	9.599111926E-01	1.039614482E-04
2	1.137815344E-07	1.179299080E-07	78	9.781476007E-01	4.322727118E-02	1.112662033E+02	9.449227932E-01	4.872334212E-05
4	8.334493027E-08	8.510073837E-08	79	9.816271834E-01	3.640807272E-02	1.439472807E+02	9.224197621E-01	8.946473986E-05
2	5.866650439E-08	5.948191779E-08	80	9.848077530E-01	3.015368961E-02	1.909806249E+02	8.875784310E-01	4.005474505E-05
4	3.957947936E-08	4.041010815E-08	81	9.876883406E-01	2.447174185E-02	2.612177449E+02	8.318384407E-01	6.952405756E-05
2	2.563106183E-08	2.704895537E-08	82	9.902680687E-01	1.936915203E-02	3.709659836E+02	7.398486904E-01	2.891697777E-05
4	1.616214181E-08	1.843212790E-08	83	9.925461516E-01	1.485213686E-02	5.524800320E+02	5.853443697E-01	4.474991244E-05
2	1.037990070E-08	1.344948946E-08	84	9.945218954E-01	1.092619963E-02	8.755809481E+02	3.355993041E-01	1.400426366E-05
4	7.369229938E-09	1.073957605E-08	85	9.961946981E-01	7.596123494E-03	1.510469551E+03	3.862713508E-02	4.226241211E-06
2	5.984242776E-09	8.578566899E-09	86	9.975640503E-01	4.865965629E-03	2.946092948E+03	2.961726796E-01	2.541362449E-05
4	4.755837885E-09	5.279891465E-09	87	9.986295348E-01	2.739052316E-03	6.975888156E+03	6.091833328E-01	1.705911329E-04
1	2.281512076E-09	5.107728840E-10	88	9.993908270E-01	1.217974870E-03	2.352569749E+04	4.509546366E-01	2.962341358E-05
							ΣR_{w1}	3.385333747E-03
1	2.281512076E-09	5.107728840E-10	88.00000000000000	9.993908270E-01	1.217974870E-03	2.352569749E+04	4.509546366E-01	2.962341358E-05
4	9.421545677E-10	1.162781620E-08	88.9710455918300	9.998387479E-01	3.224781624E-04	1.726829799E+05	2.533482636E-01	2.199691241E-03
1	7.125680102E-09	9.991271820E-09	89.9420911836600	9.999994892E-01	1.021513154E-06	9.685767837E+08	5.530089382E-01	9.168380665E+00
			88.9710455918300				ΣR_{w2}	9.170609980E+00
1	2.818885889E-31	3.232557957E-30	89.94503510547600	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043230E-01	3.911537633E-21
				R_w [N] = $(0.5\pi\rho U^2) \int A(\theta) ^2 4\cos^2[0.5(2p/L)\sin\theta/(Fn^2\cos^2\theta)] \cos(gx/U^2\cos(\theta)) \cos^3\theta d\theta$				24.839
				Экспериментальный R_w [N]				25.640

Таблица 3.15 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.94503510547600$ и функция формы судна R_w [N], Исследование 1, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{\text{псн}} = 0.424$, $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м

MC	I_{SH}^2	I_{CH}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	R_w [N]
1	1.149286224E-27	4.212482718E-27	89.94503510547540	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043877E-01	5.967586107E-18
4	7.864235596E-28	2.958177459E-27	89.94503510547550	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043767E-01	1.667078832E-17
2	4.904234015E-28	1.937866420E-27	89.94503510547560	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043657E-01	5.405316206E-18
4	2.915888544E-28	1.121261130E-27	89.94503510547570	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043560E-01	6.289941813E-18
2	1.250543739E-28	5.296367045E-28	89.94503510547580	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043450E-01	1.457326959E-18
4	2.872898074E-29	1.557931675E-28	89.94503510547590	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043340E-01	8.214839242E-19
2	2.818885889E-31	3.232557957E-30	89.94503510547600	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043230E-01	7.823075266E-21
4	4.092800356E-29	5.293807060E-29	89.94503510547610	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043120E-01	4.178873375E-19
2	1.332394725E-28	3.086991143E-28	89.94503510547620	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043023E-01	9.837448686E-19
4	3.017886596E-28	8.032804932E-28	89.94503510547630	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826042913E-01	4.919715674E-18
2	5.745680816E-28	1.499621760E-27	89.94503510547640	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826042789E-01	4.617097545E-18
4	8.905849076E-28	2.432817225E-27	89.94503510547650	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826042679E-01	1.479562897E-17
1	1.269930279E-27	3.574409683E-27	89.94503510547660	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826042569E-01	5.391692987E-18

Таблица 3.16 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 2, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{\text{псн}} = 0.509$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ м

MC	I_{SH}^2	I_{CH}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\cos^3\theta$	HIF _{TCH} = HIF _{TSH}	R_w
1	1.720097070E-06	3.096476073E-06	0	0.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00	4.816573142E-06
4	1.720030395E-06	3.096312467E-06	1	1.745240644E-02	9.996954135E-01	1.000457054E+00	9.999999714E-01	1.927417621E-05
2	1.719830228E-06	3.095821315E-06	2	3.489949670E-02	9.987820251E-01	1.001829748E+00	9.999998853E-01	9.648924834E-06
4	1.719496136E-06	3.095001608E-06	3	5.233595624E-02	9.972609477E-01	1.004122691E+00	9.999997413E-01	1.933738071E-05
2	1.719027398E-06	3.093851661E-06	4	6.975647374E-02	9.951340344E-01	1.007343597E+00	9.999995384E-01	9.696441335E-06
4	1.718423000E-06	3.092369106E-06	5	8.715574275E-02	9.924038765E-01	1.011503342E+00	9.999992754E-01	1.946451506E-05
2	1.717681629E-06	3.090550882E-06	6	1.045284633E-01	9.890738004E-01	1.016616029E+00	9.999989508E-01	9.776242229E-06

Таблица 3.16 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 2, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{нчн} = 0.509$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ м – продолжение

4	1.716801671E-06	3.088393222E-06	7	1.218693434E-01	9.851478631E-01	1.022699092E+00	9.999985624E-01	1.965704566E-05
2	1.715781199E-06	3.085891641E-06	8	1.391731010E-01	9.806308480E-01	1.029773410E+00	9.999981078E-01	9.889251319E-06
4	1.714617971E-06	3.083040912E-06	9	1.564344650E-01	9.755282581E-01	1.037863452E+00	9.999975843E-01	1.991721113E-05
2	1.713309412E-06	3.079833505E-06	10	1.736481777E-01	9.698463104E-01	1.046997448E+00	9.999969884E-01	1.003678981E-05
4	1.711852610E-06	3.076267286E-06	11	1.908089954E-01	9.635919273E-01	1.057207586E+00	9.999963164E-01	2.024807211E-05
2	1.710244300E-06	3.072330037E-06	12	2.079116908E-01	9.567727288E-01	1.068530241E+00	9.999955638E-01	1.022060528E-05
4	1.708480845E-06	3.068014878E-06	13	2.249510543E-01	9.493970231E-01	1.081006242E+00	9.999947259E-01	2.065357783E-05
2	1.706558228E-06	3.063312506E-06	14	2.419218956E-01	9.414737964E-01	1.094681162E+00	9.999937970E-01	1.044291050E-05
4	1.704472026E-06	3.058212696E-06	15	2.588190451E-01	9.330127019E-01	1.109605666E+00	9.999927709E-01	2.113865500E-05
2	1.702217393E-06	3.052704266E-06	16	2.756373558E-01	9.240240481E-01	1.125835889E+00	9.999916406E-01	1.070643341E-05
4	1.699789035E-06	3.046775024E-06	17	2.923717047E-01	9.145187863E-01	1.143433872E+00	9.999903982E-01	2.170932002E-05
2	1.697181187E-06	3.040411715E-06	18	3.090169944E-01	9.045084972E-01	1.162468045E+00	9.999890351E-01	1.101447994E-05
4	1.694387585E-06	3.033599968E-06	19	3.255681545E-01	8.940053768E-01	1.183013781E+00	9.999875414E-01	2.237281899E-05
2	1.691401433E-06	3.026324228E-06	20	3.420201433E-01	8.830222216E-01	1.205154011E+00	9.999859063E-01	1.137101175E-05
4	1.688215371E-06	3.018567690E-06	21	3.583679495E-01	8.715724127E-01	1.228979919E+00	9.999841176E-01	2.313779998E-05
2	1.684821437E-06	3.010312224E-06	22	3.746065934E-01	8.596699002E-01	1.254591725E+00	9.999821618E-01	1.178074153E-05
4	1.681211031E-06	3.001538295E-06	23	3.907311285E-01	8.473291852E-01	1.282099562E+00	9.999800237E-01	2.401452371E-05
2	1.677374861E-06	2.992224868E-06	24	4.067366431E-01	8.345653032E-01	1.311624476E+00	9.999776864E-01	1.224924926E-05
4	1.673302906E-06	2.982349319E-06	25	4.226182617E-01	8.213938048E-01	1.343299538E+00	9.999751311E-01	2.501511983E-05
2	1.668984353E-06	2.971887329E-06	26	4.383711468E-01	8.078307377E-01	1.377271115E+00	9.999723366E-01	1.278312339E-05
4	1.664407543E-06	2.960812765E-06	27	4.539904997E-01	7.938926261E-01	1.413700292E+00	9.999692792E-01	2.615389772E-05
2	1.659559909E-06	2.949097565E-06	28	4.694715628E-01	7.795964517E-01	1.452764502E+00	9.999659325E-01	1.339013177E-05
4	1.654427900E-06	2.936711599E-06	29	4.848096202E-01	7.649596321E-01	1.494659352E+00	9.999622665E-01	2.744772261E-05
2	1.648996911E-06	2.923622529E-06	30	5.000000000E-01	7.500000000E-01	1.539600718E+00	9.999582479E-01	1.407942847E-05
4	1.643251194E-06	2.909795652E-06	31	5.150380749E-01	7.347357814E-01	1.587827117E+00	9.99953389E-01	2.891647010E-05
2	1.637173770E-06	2.895193733E-06	32	5.299192642E-01	7.191855734E-01	1.639602416E+00	9.999489969E-01	1.486180338E-05
4	1.630746325E-06	2.879776827E-06	33	5.446390350E-01	7.033683215E-01	1.695218929E+00	9.999436738E-01	3.058357416E-05
2	1.623949103E-06	2.863502080E-06	34	5.591929035E-01	6.873032967E-01	1.755000964E+00	9.999378152E-01	1.574998284E-05

Таблица 3.16 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 2, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усoверш. формула Ньюмена, $F_{нсн} = 0.509$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ – продолжение.

4	1.616760785E-06	2.846323528E-06	35	5.735764364E-01	6.710100717E-01	1.819308890E+00	9.999313594E-01	3.247668650E-05
2	1.609158356E-06	2.828191867E-06	36	5.877852523E-01	6.545084972E-01	1.888543820E+00	9.999242361E-01	1.675899086E-05
4	1.601116963E-06	2.809054222E-06	37	6.018150232E-01	6.378186779E-01	1.963153011E+00	9.999163654E-01	3.462846699E-05
2	1.592609756E-06	2.788853891E-06	38	6.156614753E-01	6.209609478E-01	2.043636109E+00	9.999076560E-01	1.790658092E-05
4	1.583607718E-06	2.767530075E-06	39	6.293203910E-01	6.039558454E-01	2.130552383E+00	9.998980035E-01	3.707752582E-05
2	1.574079475E-06	2.745017600E-06	40	6.427876097E-01	5.868240888E-01	2.224529146E+00	9.998872882E-01	1.921374880E-05
4	1.563991096E-06	2.721246616E-06	41	6.560590290E-01	5.695865505E-01	2.326271560E+00	3.999501489E+00	1.594781480E-04
2	1.553305868E-06	2.696142291E-06	42	6.691306064E-01	5.522642316E-01	2.436574112E+00	9.998620967E-01	2.070533502E-05
4	1.541984053E-06	2.669624497E-06	43	6.819983601E-01	5.348782369E-01	2.556334072E+00	9.998472781E-01	4.305853674E-05
2	1.529982632E-06	2.641607479E-06	44	6.946583705E-01	5.174497484E-01	2.686567334E+00	9.998307033E-01	2.241072075E-05
4	1.517255020E-06	2.611999541E-06	45	7.071067812E-01	5.000000000E-01	2.828427125E+00	9.998121248E-01	4.670840542E-05
2	1.503750762E-06	2.580702727E-06	46	7.193398003E-01	4.825502516E-01	2.983226171E+00	9.997912533E-01	2.436461000E-05
4	1.489415214E-06	2.547612525E-06	47	7.313537016E-01	4.651217631E-01	3.152463079E+00	9.997677506E-01	5.089450062E-05
2	1.474189194E-06	2.512617602E-06	48	7.431448255E-01	4.477357684E-01	3.337853831E+00	9.997412189E-01	2.660786929E-05
4	1.458008627E-06	2.475599591E-06	49	7.547095802E-01	4.304134495E-01	3.541369556E+00	9.997111895E-01	5.570534861E-05
2	1.440804163E-06	2.436432945E-06	50	7.660444431E-01	4.131759112E-01	3.765282014E+00	9.996771076E-01	2.918835455E-05
4	1.422500801E-06	2.394984901E-06	51	7.771459615E-01	3.960441546E-01	4.012218614E+00	9.996383135E-01	6.124418956E-05
2	1.403017500E-06	2.351111558E-06	52	7.880107536E-01	3.790390522E-01	4.285229282E+00	9.995940203E-01	3.216157983E-05
4	1.382266813E-06	2.304678323E-06	53	7.986355100E-01	3.621813221E-01	4.587868120E+00	9.995432846E-01	6.762997043E-05
2	1.360154545E-06	2.255520172E-06	54	8.090169944E-01	3.454915028E-01	4.924293659E+00	9.994849698E-01	3.559094831E-05
4	1.336579473E-06	2.203482849E-06	55	8.191520443E-01	3.289899283E-01	5.299392612E+00	9.994177008E-01	7.499702429E-05
2	1.311433152E-06	2.148404063E-06	56	8.290375726E-01	3.126967033E-01	5.718933494E+00	9.993398040E-01	3.954703182E-05
4	1.284599863E-06	2.090119436E-06	57	8.386705679E-01	2.966316785E-01	6.189758519E+00	9.992492321E-01	8.349205987E-05
2	1.255956756E-06	2.028465161E-06	58	8.480480962E-01	2.808144266E-01	6.720024814E+00	9.991434656E-01	4.410498374E-05
4	1.225374286E-06	1.963281584E-06	59	8.571673007E-01	2.652642186E-01	7.319509720E+00	9.990193850E-01	9.326604269E-05
2	1.192717043E-06	1.894417971E-06	60	8.660254038E-01	2.500000000E-01	8.000000000E+00	9.988731017E-01	4.933849802E-05

Таблица 3.16 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна $R_w [N]$, Исследование 2, Тримаран, Корпуса Виглея 1и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{нч} = 0.509$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ – продолжение.

4	1.157845133E-06	1.821738716E-06	61	8.746197071E-01	2.350403679E-01	8.775791828E+00	9.986997347E-01	1.044568319E-04
2	1.120616301E-06	1.745131350E-06	62	8.829475929E-01	2.204035483E-01	9.664338369E+00	9.984931115E-01	5.530764173E-05
4	1.080889042E-06	1.664516710E-06	63	8.910065242E-01	2.061073739E-01	1.068709587E+01	9.982453632E-01	1.171557308E-04
2	1.038527030E-06	1.579861660E-06	64	8.987940404E-01	1.921692623E-01	1.187063948E+01	9.979463724E-01	6.203623485E-05
4	9.934052546E-07	1.491194789E-06	65	9.063077870E-01	1.786061952E-01	1.324814955E+01	9.975830099E-01	1.313471778E-04
2	9.454183492E-07	1.398625381E-06	66	9.135454576E-01	1.654346968E-01	1.486141289E+01	9.971380696E-01	6.947220812E-05
4	8.944916965E-07	1.302365849E-06	67	9.205048535E-01	1.526708148E-01	1.676354888E+01	9.965887593E-01	1.468060105E-04
2	8.405959328E-07	1.202757468E-06	68	9.271838546E-01	1.403300998E-01	1.902276964E+01	9.959045373E-01	7.742209882E-05
4	7.837655037E-07	1.100298684E-06	69	9.335804265E-01	1.284275873E-01	2.172763788E+01	9.950439606E-01	1.629335306E-04
2	7.241217938E-07	9.956743805E-07	70	9.396926208E-01	1.169777784E-01	2.499452836E+01	9.939500218E-01	8.545086588E-05
4	6.619010155E-07	8.897831660E-07	71	9.455185756E-01	1.059946232E-01	2.897838960E+01	9.925431279E-01	1.785200328E-04
2	5.974863118E-07	7.837578964E-07	72	9.510565163E-01	9.549150281E-02	3.388854382E+01	9.907103263E-01	9.274704106E-05
4	5.314421952E-07	6.789724375E-07	73	9.563047560E-01	8.548121372E-02	4.001234272E+01	9.882884276E-01	1.914572632E-04
2	4.645472561E-07	5.770253407E-07	74	9.612616959E-01	7.597595192E-02	4.775136325E+01	9.850369696E-01	9.798460497E-05
4	3.978178381E-07	4.796895844E-07	75	9.659258263E-01	6.698729811E-02	5.767814816E+01	9.805938320E-01	1.985231948E-04
2	3.325112175E-07	3.888183581E-07	76	9.702957263E-01	5.852620357E-02	7.062760340E+01	9.744004097E-01	9.928317623E-05
4	2.700926652E-07	3.062023051E-07	77	9.743700648E-01	5.060297685E-02	8.784881363E+01	9.655718019E-01	1.955353558E-04
2	2.121490837E-07	2.333859820E-07	78	9.781476007E-01	4.322727118E-02	1.112662033E+02	9.526646915E-01	9.445288438E-05
4	1.602372934E-07	1.714706848E-07	79	9.816271834E-01	3.640807272E-02	1.439472807E+02	9.332493187E-01	1.782448765E-04
2	1.156733968E-07	1.209518099E-07	80	9.848077530E-01	3.015368961E-02	1.909806249E+02	9.030977663E-01	8.162347496E-05
4	7.930332659E-08	8.164767019E-08	81	9.876883406E-01	2.447174185E-02	2.612177449E+02	8.546184512E-01	1.437237708E-04
2	5.133225754E-08	5.275471542E-08	82	9.902680687E-01	1.936915203E-02	3.709659836E+02	7.738963752E-01	5.976449784E-05
4	3.129806057E-08	3.300488940E-08	83	9.925461516E-01	1.485213686E-02	5.524800320E+02	6.359337269E-01	9.036897016E-05
2	1.821101466E-08	2.083197404E-08	84	9.945218954E-01	1.092619963E-02	8.755809481E+02	4.037788161E-01	2.760659755E-05
4	1.076027967E-08	1.442683673E-08	85	9.961946981E-01	7.596123494E-03	1.510469551E+03	8.715116702E-02	1.326244581E-05
2	7.404746768E-09	1.155246233E-08	86	9.975640503E-01	4.865965629E-03	2.946092948E+03	1.634757915E-01	1.826014784E-05

Таблица 3.16 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 2, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. метод Ньюмена, $F_{нCH} = 0.509$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ – продолжение.

4	6.156626346E-09	9.291844020E-09	87	9.986295348E-01	2.739052316E-03	6.975888156E+03	8.539270392E-01	3.680999428E-04
1	4.550930843E-09	4.757239723E-09	88	9.993908270E-01	1.217974870E-03	2.352569749E+04	9.770449762E-03	2.139544862E-06
							$\sum R_{w1}$	4.954098316E-03
1	4.550930843E-09	4.757239723E-09	88.00000000000000	9.993908270E-01	1.217974870E-03	2.352569749E+04	9.770449762E-03	2.139544862E-06
4	3.289244287E-10	1.463087317E-09	88.9876000906615	9.998438947E-01	3.121862217E-04	1.812923183E+05	8.666782236E-01	1.126258626E-03
1	2.827508856E-09	2.365026520E-09	89.9752001813230	9.999999063E-01	1.873491466E-07	1.233168497E+10	2.142884153E-01	1.372146804E+01
							$\sum R_{w2}$	1.372259644E+01
1	2.784618617E-29	3.869807231E-29	89.97747730638940	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238297260E-01	9.025161714E-19
				R_w [N] = $(0.5\pi r U^2) \int A(\theta) ^2 4\cos^2[0.5(2p/L)\sin\theta/(Fn^2\cos^2\theta)]\cos^3\theta d\theta$				26.219
				Экспериментальный R_w [N]				
								27.058

Таблица 3.17 – Характерный конечный корень $\theta_{rmax} = 89.9774773063894$ и функция формы R_w [N], Исследование 2, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{нCH} = 0.509$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ м

MC	I_{SH}^2	I_{CH}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	R_w [N]
1	1.911707088E-26	4.275289754E-26	89.9774773063888	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238271883E-01	8.391178488E-16
4	1.296686815E-26	3.109380247E-26	89.9774773063889	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238276203E-01	2.390310871E-15
2	8.541592929E-27	2.006192163E-26	89.9774773063890	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238279982E-01	7.758770148E-16
4	4.624208714E-27	1.131618359E-26	89.9774773063891	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238284302E-01	8.647741838E-16
2	1.903536951E-27	5.132846380E-27	89.9774773063892	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238288621E-01	1.908637418E-16
4	3.660251677E-28	1.348638552E-27	89.9774773063893	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238292940E-01	9.302145428E-17
2	2.784618617E-29	3.869807231E-29	89.9774773063894	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238297260E-01	1.805032343E-18
4	7.101729567E-28	8.232336464E-28	89.9774773063895	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238301039E-01	8.318823732E-17
2	2.608905623E-27	4.039504668E-27	89.9774773063896	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238305358E-01	1.803402379E-16
4	5.710268261E-27	9.682507274E-27	89.9774773063897	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238309678E-01	8.350682750E-16
1	9.992220927E-27	1.781334649E-26	89.9774773063898	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238313997E-01	7.542356262E-16

Таблица 3.18 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 3, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. метод Ньюмена, $F_{нСН} = 0.509$, $2p/L = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму

MC	I_{SH}^2	I_{CH}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	HIF _L	fRw
1	1.720097070E-06	3.096476073E-06	0	0.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00	9.999112099E-01	4.816145478E-06
4	1.720030395E-06	3.096312467E-06	1	1.745240644E-02	9.996954135E-01	1.000457054E+00	9.999999839E-01	9.999111828E-01	1.927246457E-05
2	1.719830228E-06	3.095821315E-06	2	3.489949670E-02	9.987820251E-01	1.001829748E+00	9.999999355E-01	9.999111016E-01	9.648067544E-06
4	1.719496136E-06	3.095001608E-06	3	5.233595624E-02	9.972609477E-01	1.004122691E+00	9.999998545E-01	9.999109660E-01	1.933566121E-05
2	1.719027398E-06	3.093851661E-06	4	6.975647374E-02	9.951340344E-01	1.007343597E+00	9.99997404E-01	9.999107757E-01	9.695578135E-06
4	1.718423000E-06	3.092369106E-06	5	8.715574275E-02	9.924038765E-01	1.011503342E+00	9.99995924E-01	9.999105303E-01	1.946277975E-05
2	1.717681629E-06	3.090550882E-06	6	1.045284633E-01	9.890738004E-01	1.016616029E+00	9.999994098E-01	9.999102290E-01	9.775369094E-06
4	1.716801671E-06	3.088393222E-06	7	1.218693434E-01	9.851478631E-01	1.022699092E+00	9.99991914E-01	9.999098713E-01	1.965528626E-05
2	1.715781199E-06	3.085891641E-06	8	1.391731010E-01	9.806308480E-01	1.029773410E+00	9.99989357E-01	9.999094562E-01	9.888364094E-06
4	1.714617971E-06	3.083040912E-06	9	1.564344650E-01	9.755282581E-01	1.037863452E+00	9.99986412E-01	9.999089826E-01	1.991541936E-05
2	1.713309412E-06	3.079835050E-06	10	1.736481777E-01	9.698463104E-01	1.046997448E+00	9.999983060E-01	9.999084494E-01	1.003588416E-05
4	1.711852610E-06	3.076267286E-06	11	1.90808954E-01	9.635919273E-01	1.057207586E+00	9.99979280E-01	9.999078551E-01	2.024623899E-05
2	1.710244300E-06	3.072330037E-06	12	2.079116908E-01	9.567727288E-01	1.068530241E+00	9.99975048E-01	9.999071984E-01	1.021967663E-05
4	1.708480845E-06	3.068014878E-06	13	2.249510543E-01	9.493970231E-01	1.081006242E+00	9.99970335E-01	9.999064775E-01	2.065169391E-05
2	1.706558228E-06	3.063312506E-06	14	2.419218956E-01	9.414737964E-01	1.094681162E+00	9.99965110E-01	9.999056904E-01	1.044195397E-05
4	1.704472026E-06	3.058212696E-06	15	2.588190451E-01	9.330127019E-01	1.109605666E+00	9.99959338E-01	9.999048352E-01	2.113671019E-05
2	1.702217393E-06	3.052704266E-06	16	2.756373558E-01	9.240240481E-01	1.125835889E+00	9.99952981E-01	9.999039095E-01	1.070544378E-05
4	1.699789035E-06	3.046775024E-06	17	2.923717047E-01	9.145187863E-01	1.143433872E+00	9.99945993E-01	9.999029108E-01	2.170730348E-05
2	1.697181187E-06	3.040411715E-06	18	3.090169944E-01	9.045084972E-01	1.162468045E+00	9.99938325E-01	9.999018363E-01	1.101345156E-05
4	1.694387585E-06	3.033599968E-06	19	3.255681545E-01	8.940053768E-01	1.183013781E+00	9.99929924E-01	9.999006831E-01	2.237071894E-05
2	1.691401433E-06	3.026324228E-06	20	3.420201433E-01	8.83022216E-01	1.205154011E+00	9.99920727E-01	9.998994478E-01	1.136993848E-05
4	1.688215371E-06	3.018567690E-06	21	3.583679495E-01	8.715724127E-01	1.228979919E+00	9.99910666E-01	9.998981269E-01	2.313560363E-05
2	1.684821437E-06	3.010312224E-06	22	3.746065934E-01	8.596699002E-01	1.254591725E+00	9.99899664E-01	9.998967165E-01	1.177961671E-05
4	1.6812111031E-06	3.001538295E-06	23	3.907311285E-01	8.473291852E-01	1.282099562E+00	9.99887638E-01	9.998952123E-01	2.401221715E-05
2	1.677374861E-06	2.992224868E-06	24	4.067366431E-01	8.345653032E-01	1.311624476E+00	9.99874491E-01	9.998936097E-01	1.224806564E-05

Таблица 3.18 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 3, Тримаран, Корпуса Вигля 1 и 4, МКК, усoверш. формула Ньюмена, $F_{пн} = 0.509$, $2p/L = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму – продолжение.

4	1.673302906E-06	2.982349319E-06	25	4.226182617E-01	8.213938048E-01	1.343299538E+00	9.99860118E-01	9.998919038E-01	2.501268795E-05
2	1.668984353E-06	2.971887329E-06	26	4.383711468E-01	8.078307377E-01	1.377271115E+00	9.99844400E-01	9.998900890E-01	1.278187309E-05
4	1.664407543E-06	2.960812765E-06	27	4.539904997E-01	7.938926261E-01	1.413700292E+00	9.99827203E-01	9.998881594E-01	2.615132415E-05
2	1.659559909E-06	2.949097565E-06	28	4.694715628E-01	7.795964517E-01	1.452764502E+00	9.99808378E-01	9.998861085E-01	1.338880632E-05
4	1.654427900E-06	2.936711599E-06	29	4.848096202E-01	7.649596321E-01	1.494659352E+00	9.99787758E-01	9.998839294E-01	2.744498985E-05
2	1.648996911E-06	2.923622529E-06	30	5.000000000E-01	7.500000000E-01	1.539600718E+00	9.99765154E-01	9.998816143E-01	1.407801885E-05
4	1.643251194E-06	2.909795652E-06	31	5.150380749E-01	7.347357814E-01	1.587827117E+00	9.99740354E-01	9.998791549E-01	2.891355966E-05
2	1.637173770E-06	2.895193733E-06	32	5.299192642E-01	7.191855734E-01	1.639602416E+00	9.99713119E-01	9.998765421E-01	1.486030019E-05
4	1.630746325E-06	2.879776827E-06	33	5.446390350E-01	7.033683215E-01	1.695218929E+00	9.99683177E-01	9.998737660E-01	3.058046712E-05
2	1.623949103E-06	2.863502080E-06	34	5.591929035E-01	6.873032967E-01	1.755000964E+00	9.99650224E-01	9.998708155E-01	1.574837667E-05
4	1.616760785E-06	2.846323528E-06	35	5.735764364E-01	6.710100717E-01	1.819308890E+00	9.99613911E-01	9.998676788E-01	3.247336441E-05
2	1.609158356E-06	2.828191867E-06	36	5.877852523E-01	6.545084972E-01	1.888543820E+00	9.99573843E-01	9.998643429E-01	1.675727288E-05
4	1.601116963E-06	2.809054222E-06	37	6.018150232E-01	6.378186779E-01	1.963153011E+00	9.99529571E-01	9.998607933E-01	3.462491352E-05
2	1.592609756E-06	2.788853891E-06	38	6.156614753E-01	6.209609478E-01	2.043636109E+00	9.99480582E-01	9.998570143E-01	1.790474396E-05
4	1.583607718E-06	2.767530075E-06	39	6.293203910E-01	6.039558454E-01	2.130552383E+00	9.99426288E-01	9.998529886E-01	3.707372952E-05
2	1.574079475E-06	2.745017600E-06	40	6.427876097E-01	5.868240888E-01	2.224529146E+00	9.99366015E-01	9.998486969E-01	1.921178915E-05
4	1.563991096E-06	2.721246616E-06	41	6.560590290E-01	5.695866550E-01	2.326271560E+00	9.99298988E-01	9.998441182E-01	3.986549595E-05
2	1.553305868E-06	2.696142291E-06	42	6.691306064E-01	5.522642316E-01	2.436574112E+00	9.99224314E-01	9.998392291E-01	2.070325543E-05
4	1.541984053E-06	2.669624497E-06	43	6.819983601E-01	5.348782369E-01	2.556334072E+00	9.99140960E-01	9.998340036E-01	4.305426623E-05
2	1.529982632E-06	2.641607479E-06	44	6.946583705E-01	5.174497484E-01	2.686567334E+00	9.99047727E-01	9.998284129E-01	2.240853330E-05
4	1.517255020E-06	2.611999541E-06	45	7.071067812E-01	5.000000000E-01	2.828427125E+00	9.998943222E-01	9.998224250E-01	4.670395053E-05
2	1.503750762E-06	2.580702727E-06	46	7.193398003E-01	4.825502516E-01	2.983226171E+00	9.99825819E-01	9.998160040E-01	2.436235225E-05
4	1.489415214E-06	2.547612525E-06	47	7.313337016E-01	4.651217631E-01	3.152463079E+00	9.998693613E-01	9.998091099E-01	5.088995701E-05
2	1.474189194E-06	2.512617602E-06	48	7.431448255E-01	4.477357684E-01	3.337853831E+00	9.998544369E-01	9.998016980E-01	2.660560556E-05
4	1.458008627E-06	2.475599591E-06	49	7.547095802E-01	4.304134495E-01	3.541369556E+00	9.998375448E-01	9.997937177E-01	5.570089684E-05
2	1.440804163E-06	2.436432945E-06	50	7.660444431E-01	4.131759112E-01	3.765282014E+00	9.998183729E-01	9.997851123E-01	2.918620608E-05
4	1.422500801E-06	2.394984901E-06	51	7.771459615E-01	3.960441546E-01	4.012218614E+00	9.997965501E-01	9.997758176E-01	6.124015209E-05

Таблица 3.18 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 3, Тримаран, Корпуса 1 и 4, МКК, усовersh. формула Ньюмена, $F_{нсн} = 0.509$, $2p/L = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму – продолжение.

2	1.403017500E-06	2.351115588E-06	52	7.880107536E-01	3.790390522E-01	4.285229282E+00	9.997716335E-01	9.997657607E-01	3.215975962E-05
4	1.382266813E-06	2.304678323E-06	53	7.986355100E-01	3.621813221E-01	4.587868120E+00	9.997430924E-01	9.997548589E-01	6.762690740E-05
2	1.360154545E-06	2.255520172E-06	54	8.090169944E-01	3.454915028E-01	4.924293659E+00	9.997102872E-01	9.997430178E-01	3.558982340E-05
4	1.336579473E-06	2.203482849E-06	55	8.191520443E-01	3.289899283E-01	5.299392612E+00	9.996724441E-01	9.997301292E-01	7.499589575E-05
2	1.311433152E-06	2.148404063E-06	56	8.290375726E-01	3.126967033E-01	5.718933494E+00	9.996286212E-01	9.997160688E-01	3.954722935E-05
4	1.284599863E-06	2.090119436E-06	57	8.386705679E-01	2.966316785E-01	6.189758519E+00	9.995776664E-01	9.997006931E-01	8.349450417E-05
2	1.255956756E-06	2.028465161E-06	58	8.480480962E-01	2.808144266E-01	6.720024814E+00	9.995181616E-01	9.996838360E-01	4.410757423E-05
4	1.225374286E-06	1.963281584E-06	59	8.571673007E-01	2.652642186E-01	7.319509720E+00	9.994483508E-01	9.996653040E-01	9.327486073E-05
2	1.192717043E-06	1.894417971E-06	60	8.660254038E-01	2.500000000E-01	8.000000000E+00	9.993660449E-01	9.996448710E-01	4.934531636E-05
4	1.157845133E-06	1.821738716E-06	61	8.746197071E-01	2.350403679E-01	8.775791828E+00	9.992684960E-01	9.996222709E-01	1.044768414E-04
2	1.120616301E-06	1.745131350E-06	62	8.829475929E-01	2.204035483E-01	9.664338369E+00	9.991522282E-01	9.995971896E-01	5.532185774E-05
4	1.080889042E-06	1.664516710E-06	63	8.910065242E-01	2.061073739E-01	1.068709587E+01	9.990128099E-01	9.995692536E-01	1.171952964E-04
2	1.03827030E-06	1.579861660E-06	64	8.987940463E-01	1.921692623E-01	1.187063948E+01	9.988445418E-01	9.995380162E-01	6.206338303E-05
4	9.934052546E-07	1.491194789E-06	65	9.063077870E-01	1.786061952E-01	1.324814955E+01	9.986400265E-01	9.995029397E-01	1.314209937E-04
2	9.454183492E-07	1.398625381E-06	66	9.135454576E-01	1.654346968E-01	1.486141289E+01	9.983895662E-01	9.994633720E-01	6.952207437E-05
4	8.944916965E-07	1.302365849E-06	67	9.205048535E-01	1.526708148E-01	1.676354888E+01	9.980803102E-01	9.994185165E-01	1.469402356E-04
2	8.405959328E-07	1.202757468E-06	68	9.271838546E-01	1.403300998E-01	1.902276964E+01	9.976950308E-01	9.993673913E-01	7.751222670E-05
4	7.837655037E-07	1.100298684E-06	69	9.335804265E-01	1.284275873E-01	2.172763788E+01	9.972103379E-01	9.993087754E-01	1.631753954E-04
2	7.241217938E-07	9.956743805E-07	70	9.396926208E-01	1.169777784E-01	2.499452836E+01	9.965940345E-01	9.992411353E-01	8.561315612E-05
4	6.619010155E-07	8.897831660E-07	71	9.455185756E-01	1.059946232E-01	2.897838960E+01	9.958011273E-01	9.991625238E-01	1.789560235E-04
2	5.974863118E-07	7.837578964E-07	72	9.510565163E-01	9.549150281E-02	3.388854382E+01	9.947676918E-01	9.990704382E-01	9.304031109E-05
4	5.314421952E-07	6.789724375E-07	73	9.563047560E-01	8.548121372E-02	4.001234272E+01	9.934012342E-01	9.989616195E-01	1.922479133E-04
2	4.645472561E-07	5.770253407E-07	74	9.612616959E-01	7.597595192E-02	4.775136325E+01	9.915651930E-01	9.988317595E-01	9.851875887E-05
4	3.978178381E-07	4.796895844E-07	75	9.659258263E-01	6.698729811E-02	5.767814816E+01	9.890533664E-01	9.986750691E-01	1.999705459E-04
2	3.325112175E-07	3.888183581E-07	76	9.702957263E-01	5.852620357E-02	7.062760340E+01	9.855464999E-01	9.984836216E-01	1.002665957E-04

Таблица 3.19 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9774773063894$ аи функция формы $R_w [N]$, Исследование 3, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{\text{нСН}} = 0.509$, $2p/L = 0.216$, $LS = 0$ м в корму

MC	I_{SH}^2	I_{CH}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	HIF_L	$R_w [N]$
1	1.911707088E-26	4.275289754E-26	89.9774773063888	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.6462922289E+10	9.767994484E-01	1.583990166E-01	1.575958311E-16
4	1.296686815E-26	3.109380247E-26	89.9774773063889	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.6462922289E+10	9.767993204E-01	1.583990166E-01	4.489271469E-16
2	8.541592929E-27	2.006192163E-26	89.9774773063890	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.6462922289E+10	9.767992084E-01	1.583990167E-01	1.457183077E-16
4	4.624208714E-27	1.131618359E-26	89.9774773063891	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.6462922289E+10	9.767990804E-01	1.583990168E-01	1.624140755E-16
2	1.903536951E-27	5.132846380E-27	89.9774773063892	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.6462922289E+10	9.767989524E-01	1.583990169E-01	3.584628041E-17
4	3.660251677E-28	1.348638552E-27	89.9774773063893	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.6462922289E+10	9.767988244E-01	1.583990169E-01	1.747042638E-17
2	2.784618617E-29	3.869807231E-29	89.9774773063894	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.6462922289E+10	9.767986964E-01	1.583990170E-01	3.390042034E-19
4	7.101729567E-28	8.232336464E-28	89.9774773063895	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.6462922289E+10	9.767985844E-01	1.583990171E-01	1.562362363E-17
2	2.608905623E-27	4.039504668E-27	89.9774773063896	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.6462922289E+10	9.767984564E-01	1.583990172E-01	3.386976630E-17
4	5.710268261E-27	9.682507274E-27	89.9774773063897	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.6462922289E+10	9.767983283E-01	1.583990173E-01	1.568343767E-16
2	9.992220927E-27	1.781334649E-26	89.9774773063898	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.6462922289E+10	9.767982003E-01	1.583990173E-01	1.416530844E-16
4	1.545281901E-26	2.836301467E-26	89.9774773063899	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.6462922289E+10	9.767980723E-01	1.583990174E-01	4.464319742E-16
1	2.217328683E-26	3.957050380E-26	89.9774773063900	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.6462922289E+10	9.767979443E-01	1.583990175E-01	1.572741885E-16

Таблица 3.20 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна $R_w [N]$, Исследование 4, Тримаран, Корпуса Виглея 1 and 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{\text{нСН}} = 0.594$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму

MC	I_{SH}^2	I_{CH}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	HIF_L	fR_w
1	1.779569086E-06	3.243718313E-06	0	0.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00	9.999520664E-01	5.023046616E-06
4	1.779518096E-06	3.243591332E-06	1	1.745240644E-02	9.996954135E-01	1.000457054E+00	9.999999845E-01	9.999520518E-01	2.010065689E-05
2	1.779365010E-06	3.243210114E-06	2	3.489949670E-02	9.987820251E-01	1.001829748E+00	9.999999381E-01	9.999520080E-01	1.006304675E-05
4	1.779109488E-06	3.242573838E-06	3	5.233595624E-02	9.972609477E-01	1.004122691E+00	9.999998603E-01	9.999519348E-01	2.016857242E-05
2	1.778750959E-06	3.241681133E-06	4	6.975647374E-02	9.951340344E-01	1.007343597E+00	9.999997508E-01	9.999518320E-01	1.011411053E-05
4	1.778288620E-06	3.240530068E-06	5	8.715574275E-02	9.924038765E-01	1.011503342E+00	9.999996089E-01	9.999516995E-01	2.030521876E-05

Таблица 3.20 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна $R_w [N]$, Исследование 4, Тримаран, Корпуса Вигля 1 и 4, МКК, усoверш. формула Ньюмена, $F_{нчн} = 0.594$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму – продолжение.

2	1.77772143E-06	3.239118148E-06	6	1.045284633E-01	9.890738004E-01	1.016616029E+00	9.999994336E-01	9.999515369E-01	1.019989894E-05
4	1.777048114E-06	3.237442302E-06	7	1.218693434E-01	9.851478631E-01	1.022699092E+00	9.999992239E-01	9.999513438E-01	2.051224517E-05
2	1.776267143E-06	3.235498867E-06	8	1.391731010E-01	9.806308480E-01	1.029773410E+00	9.999989786E-01	9.999511197E-01	1.0321451167E-05
4	1.775376739E-06	3.233283575E-06	9	1.564344650E-01	9.755282581E-01	1.037863452E+00	9.999986959E-01	9.999508640E-01	2.079217313E-05
2	1.774374861E-06	3.230791534E-06	10	1.736481777E-01	9.698463104E-01	1.046997448E+00	9.999983743E-01	9.999505761E-01	1.048025784E-05
4	1.773259196E-06	3.228017203E-06	11	1.908089954E-01	9.635919273E-01	1.057207586E+00	9.999980115E-01	9.999502553E-01	2.114845523E-05
2	1.772027149E-06	3.224954372E-06	12	2.079116908E-01	9.567727288E-01	1.068530241E+00	9.999976053E-01	9.999499008E-01	1.067829117E-05
4	1.770675830E-06	3.221596128E-06	13	2.249510543E-01	9.493970231E-01	1.081006242E+00	9.999971529E-01	9.999495116E-01	2.158555725E-05
2	1.769202040E-06	3.217934830E-06	14	2.419218956E-01	9.414737964E-01	1.094681162E+00	9.999966515E-01	9.999490867E-01	1.091805710E-05
4	1.767602254E-06	3.213962069E-06	15	2.588190451E-01	9.330127019E-01	1.109605666E+00	9.999960976E-01	9.999486250E-01	2.210906580E-05
2	1.765872608E-06	3.209668630E-06	16	2.756373558E-01	9.240240481E-01	1.125835889E+00	9.999954874E-01	9.999481253E-01	1.120265407E-05
4	1.764008872E-06	3.205044448E-06	17	2.923717047E-01	9.145187863E-01	1.143433872E+00	9.999948168E-01	9.999475861E-01	2.272582649E-05
2	1.762006436E-06	3.200078564E-06	18	3.090169944E-01	9.045084972E-01	1.162468045E+00	9.999940809E-01	9.999470060E-01	1.153585085E-05
4	1.759860280E-06	3.194759066E-06	19	3.255681545E-01	8.940053768E-01	1.183013781E+00	9.999932746E-01	9.999463835E-01	2.344411713E-05
2	1.757564955E-06	3.189073037E-06	20	3.420201433E-01	8.830222216E-01	1.205154011E+00	9.999923919E-01	9.999457166E-01	1.192218332E-05
4	1.755111454E-06	3.183006487E-06	21	3.583679495E-01	8.715724127E-01	1.228979919E+00	9.999914263E-01	9.999450035E-01	2.427386317E-05
2	1.752502640E-06	3.176544283E-06	22	3.746065934E-01	8.596699002E-01	1.254591725E+00	9.999903705E-01	9.999442420E-01	1.236707426E-05
4	1.749722303E-06	3.169670076E-06	23	3.907311285E-01	8.473291852E-01	1.282099562E+00	9.999892164E-01	9.999434300E-01	2.522690404E-05
2	1.746766027E-06	3.162366213E-06	24	4.067366431E-01	8.345653032E-01	1.311624476E+00	9.999879546E-01	9.999425648E-01	1.287698123E-05
4	1.743625693E-06	3.154613647E-06	25	4.226182617E-01	8.213938048E-01	1.343299538E+00	9.999865752E-01	9.999416438E-01	2.631732138E-05
2	1.740292523E-06	3.146391833E-06	26	4.383711468E-01	8.078307377E-01	1.377271115E+00	9.999850667E-01	9.999406641E-01	1.345957872E-05
4	1.736757029E-06	3.137678622E-06	27	4.539904997E-01	7.938926261E-01	1.413700292E+00	9.999834162E-01	9.999396223E-01	2.756184309E-05
2	1.733008956E-06	3.128450137E-06	28	4.694715628E-01	7.795964517E-01	1.452764502E+00	9.999816096E-01	9.999385152E-01	1.412398216E-05
4	1.729037218E-06	3.118680639E-06	29	4.848096202E-01	7.649596321E-01	1.494659352E+00	9.999796306E-01	9.999373387E-01	2.898034090E-05
2	1.724829829E-06	3.108342388E-06	30	5.000000000E-01	7.500000000E-01	1.539600718E+00	9.999774612E-01	9.999360889E-01	1.488102428E-05
4	1.720373824E-06	3.097405478E-06	31	5.150380749E-01	7.347357814E-01	1.587827117E+00	9.999750811E-01	9.999347612E-01	3.059644377E-05
2	1.715655179E-06	3.085837667E-06	32	5.299192642E-01	7.191855734E-01	1.639602416E+00	9.999724673E-01	9.999333506E-01	1.574359566E-05
4	1.710658715E-06	3.073604186E-06	33	5.446390350E-01	7.033683215E-01	1.695218929E+00	9.999695937E-01	9.999318519E-01	3.243829495E-05

Таблица 3.20 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 4, Тримаран, Корпуса Вигля 1 и 4, МКК, усoверш. формула Ньюмена, $F_{нчн} = 0.594$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму – продолжение.

2	1.705367994E-06	3.060667533E-06	34	6.873032967E-01	1.755000964E+00	9.999664311E-01	9.999302590E-01	1.672706568E-05
4	1.699765206E-06	3.046987243E-06	35	6.710100717E-01	1.819308890E+00	9.999629460E-01	9.999285656E-01	3.453948827E-05
2	1.693831042E-06	3.032519641E-06	36	6.545084972E-01	1.888543820E+00	9.999591006E-01	9.999267646E-01	1.784980329E-05
4	1.687544555E-06	3.017217573E-06	37	6.378186779E-01	1.963153011E+00	9.999548518E-01	9.999248483E-01	3.694022744E-05
2	1.673821689E-06	3.001030105E-06	38	6.209609478E-01	2.043636109E+00	9.999501502E-01	9.999228082E-01	1.910496450E-05
4	1.673821689E-06	2.983902204E-06	39	6.039558454E-01	2.130552383E+00	9.999449394E-01	9.999206348E-01	3.968876323E-05
2	1.666333746E-06	2.965774382E-06	40	5.868240888E-01	2.224529146E+00	9.999391548E-01	9.999183179E-01	2.060558190E-05
4	1.658389953E-06	2.946582312E-06	41	5.695865503E-01	2.326271560E+00	9.999327221E-01	9.999158460E-01	4.284317549E-05
2	1.649958485E-06	2.926256413E-06	42	5.52242316E-01	2.436574112E+00	9.999255555E-01	9.999132065E-01	2.229697794E-05
4	1.641004660E-06	2.904721397E-06	43	5.348782369E-01	2.556334072E+00	9.999175557E-01	9.999103854E-01	4.647358037E-05
2	1.631490651E-06	2.881895775E-06	44	5.174497484E-01	2.686567334E+00	9.999086079E-01	9.999073671E-01	2.424657049E-05
4	1.621375166E-06	2.857691337E-06	45	5.000000000E-01	2.828427125E+00	9.998985783E-01	9.999041344E-01	5.066485574E-05
2	1.610613093E-06	2.832012576E-06	46	4.825502516E-01	2.983226171E+00	9.998873108E-01	9.999006679E-01	2.650109464E-05
4	1.599155114E-06	2.804756095E-06	47	4.651217631E-01	3.152463079E+00	9.998746226E-01	9.998969459E-01	5.551998527E-05
2	1.586947269E-06	2.775809957E-06	48	4.477357684E-01	3.337853831E+00	9.998602992E-01	9.998929444E-01	2.911730562E-05
4	1.573930481E-06	2.745053021E-06	49	4.304134495E-01	3.541369556E+00	9.998440874E-01	9.998886360E-01	6.116411571E-05
2	1.560040032E-06	2.712354246E-06	50	4.131759112E-01	3.765282014E+00	9.998256876E-01	9.998839901E-01	3.216419861E-05
4	1.545204985E-06	2.677571979E-06	51	3.960441546E-01	4.012218614E+00	9.998047436E-01	9.998789721E-01	6.774938410E-05
2	1.529347559E-06	2.640553262E-06	52	3.790390522E-01	4.285229282E+00	9.997808304E-01	9.998735425E-01	3.572561118E-05
4	1.512382448E-06	2.601133149E-06	53	3.621813221E-01	4.587868120E+00	9.997534386E-01	9.998676568E-01	7.546046759E-05
2	1.494216089E-06	2.559134107E-06	54	3.454915028E-01	4.924293659E+00	9.997219545E-01	9.998612640E-01	3.990313705E-05
4	1.474745880E-06	2.514365515E-06	55	3.289899283E-01	5.299392612E+00	9.996856352E-01	9.998543055E-01	8.452057131E-05
2	1.453859367E-06	2.466623352E-06	56	3.126967033E-01	5.718933494E+00	9.996435769E-01	9.998467144E-01	4.481910599E-05
4	1.431433410E-06	2.415690154E-06	57	2.966316783E-01	6.189758519E+00	9.995946738E-01	9.998384132E-01	9.519707058E-05
2	1.407333351E-06	2.361335358E-06	58	2.808144266E-01	6.720024814E+00	9.995375649E-01	9.998293121E-01	5.061903010E-05
4	1.381412239E-06	2.303316209E-06	59	2.652642186E-01	7.319509720E+00	9.994705648E-01	9.998193068E-01	1.078050233E-04

Таблица 3.20 Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна $R_w [N]$, Исследование 4, Тримаран, Корпуса Вигля 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{нч} = 0.594$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму – продолжение.

2	1.35351016E-06	2.241379435E-06	60	8.660254038E-01	2.500000000E-01	8.000000000E+00	9.993915726E-01	9.998082749E-01	5.747221687E-05
4	1.323453779E-06	2.175263970E-06	61	8.746197071E-01	2.350403679E-01	8.775791828E+00	9.992979507E-01	9.997960730E-01	1.227048236E-04
2	1.291056199E-06	2.104705114E-06	62	8.829475929E-01	2.204035483E-01	9.664338369E+00	9.991863633E-01	9.997825313E-01	6.556790712E-05
4	1.256117364E-06	2.029440570E-06	63	8.910065242E-01	2.061073739E-01	1.068709587E+01	9.990525569E-01	9.997674483E-01	1.402865885E-04
2	1.218425223E-06	1.949219002E-06	64	8.987940463E-01	1.921692623E-01	1.187063948E+01	9.988910612E-01	9.997505826E-01	7.510179228E-05
4	1.177758053E-06	1.863811815E-06	65	9.063077870E-01	1.786061952E-01	1.324814955E+01	9.986947762E-01	9.997316440E-01	1.609271156E-04
2	1.133888420E-06	1.773029115E-06	66	9.135454576E-01	1.654346968E-01	1.486141289E+01	9.984543936E-01	9.997102802E-01	8.624326663E-05
4	1.086589467E-06	1.676740863E-06	67	9.205048535E-01	1.526708148E-01	1.676354888E+01	9.981575790E-01	9.996860610E-01	1.848934412E-04
2	1.035644412E-06	1.574904438E-06	68	9.271838546E-01	1.403300998E-01	1.902276964E+01	9.977877959E-01	9.996584562E-01	9.906617626E-05
4	9.808604431E-07	1.467599729E-06	69	9.335804265E-01	1.284275873E-01	2.172763788E+01	9.973225923E-01	9.996268062E-01	2.121480777E-04
2	9.220884619E-07	1.355072706E-06	70	9.396926208E-01	1.169777784E-01	2.499452836E+01	9.967310615E-01	9.995902829E-01	1.134145383E-04
4	8.592504302E-07	1.237787671E-06	71	9.455185756E-01	1.059946232E-01	2.897838960E+01	9.959700112E-01	9.995478345E-01	2.419860911E-04
2	7.923762199E-07	1.116487017E-06	72	9.510565163E-01	9.549150281E-02	3.388854382E+01	9.949780718E-01	9.994981091E-01	1.286628608E-04
4	7.216516682E-07	9.922547404E-07	73	9.563047560E-01	8.548121372E-02	4.001234272E+01	9.936664397E-01	9.994393461E-01	2.724194671E-04
2	6.474785971E-07	8.665758134E-07	74	9.612616959E-01	7.597595192E-02	4.775136325E+01	9.919039886E-01	9.993692181E-01	1.4333552005E-04
4	5.705451954E-07	7.413774759E-07	75	9.659258263E-01	6.698729811E-02	5.767814816E+01	9.894926959E-01	9.992845971E-01	2.992824999E-04
2	4.919004091E-07	6.190308438E-07	76	9.702957263E-01	5.852620357E-02	7.062760340E+01	9.861259133E-01	9.991812000E-01	1.546209279E-04
4	4.130177258E-07	5.022838451E-07	77	9.743700648E-01	5.060297685E-02	8.784881363E+01	9.813152298E-01	9.990530359E-01	3.153241131E-04
2	3.358214167E-07	3.940940617E-07	78	9.781476007E-01	4.322727118E-02	1.112662033E+02	9.742577478E-01	9.988915187E-01	1.580731224E-04
4	2.626339007E-07	2.973411785E-07	79	9.816271834E-01	3.640807272E-02	1.439472807E+02	9.635858562E-01	9.986839923E-01	3.102777701E-04
2	1.959945506E-07	2.144339658E-07	80	9.848077530E-01	3.015368961E-02	1.909806249E+02	9.468757543E-01	9.984111747E-01	1.482037739E-04
4	1.383162807E-07	1.468893449E-07	81	9.876883406E-01	2.447174185E-02	2.612177449E+02	9.196411338E-01	9.980425158E-01	2.735194315E-04
2	9.141153587E-08	9.502829472E-08	82	9.902680687E-01	1.936915203E-02	3.709659836E+02	8.731983220E-01	9.975272635E-01	1.204870718E-04
4	5.603732262E-08	5.794181133E-08	83	9.925461516E-01	1.485213686E-02	5.524800320E+02	7.901055310E-01	9.967760335E-01	1.983739401E-04
2	3.170367711E-08	3.375863854E-08	84	9.945218954E-01	1.092619963E-02	8.755809481E+02	6.354915465E-01	9.956193111E-01	7.253051348E-05
4	1.689412873E-08	2.002354540E-08	85	9.961946981E-01	7.596123494E-03	1.510469551E+03	3.536519480E-01	9.937028939E-01	7.838607298E-05

Таблица 3.20 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 4, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{nCH} = 0.594$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму – продолжение.

2	9.500142201E-09	1.385033267E-08	86	9.975640503E-01	4.865965629E-03	2.946092948E+03	1.224288132E-02	9.901813640E-01	1.667902060E-06
4	6.964855138E-09	1.150383926E-08	87	9.986295348E-01	2.739052316E-03	6.975888156E+03	7.310204423E-01	9.826015125E-01	3.701712159E-04
1	5.845012590E-09	8.375070016E-09	88	9.993908270E-01	1.217974870E-03	2.352569749E+04	8.186294519E-01	9.611578211E-01	2.632247349E-04
1	5.845012590E-09	8.375070016E-09	88.00000000000000	9.993908270E-01	1.217974870E-03	2.352569749E+04	8.186294519E-01	$\sum R_{w1}$	6.650817794E-03
4	2.192912730E-09	4.210012836E-10	88.9926700005107	9.998454542E-01	3.090676314E-04	1.840431739E+05	2.506490360E-01	9.611578211E-01	2.632247349E-04
1	7.828954205E-09	2.134658379E-09	89.9853400010215	9.999999673E-01	6.546702499E-08	5.969886733E+10	1.940154187E-01	1.211337801E-01	1.397926827E+01
1	3.50868E-28	2.717040064E-28	89.9862636044935	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262450376E-01	$\sum R_{w2}$	1.397994280E+01
R_w [N] = $(0.5\pi p U^2) \int A(\theta) ^2 4 \cos^2[0.5(2p/L) \sin\theta / (Fn^2 \cos^2\theta)] [\cos(gx/U^2 \cos(\theta))] \cos^3\theta d\theta$									19.687
Экспериментальный R_w [N]									20.321

Таблица 3.21 – Характерный конечный корень $\theta_{rmax} = 89.9862636044935$ и функция формы R_w [N], Исследование 4, Тримаран, Корпуса Виглея 1 и 4, МКК, усоверш. формула Ньюмена, $F_{nCH} = 0.594$, $2p/L = 0.288$, $LS = 0$ м в корму

MC	I_{sh}^2	I_{ch}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	HIF _L	R_w [N]
1	3.111582909E-26	1.083716554E-25	89.9862636044931	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262511830E-01	5.935552715E-02	1.359367293E-16
4	1.626819620E-26	6.190659484E-26	89.9862636044932	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262496466E-01	5.935552723E-02	3.047371112E-16
2	6.208660755E-27	2.815434811E-26	89.9862636044933	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262481103E-01	5.935552732E-02	6.697563767E-17
4	8.975507122E-28	7.596602345E-27	89.9862636044934	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262465739E-01	5.935552741E-02	3.311103853E-17
2	3.508684267E-28	2.717040064E-28	89.9862636044935	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262450376E-01	5.935552749E-02	1.213415848E-18
4	3.795685495E-27	4.135515040E-27	89.9862636044936	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262436933E-01	5.935552757E-02	3.091620104E-17
2	1.219011722E-26	2.103290887E-26	89.9862636044937	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262421569E-01	5.935552766E-02	6.475203696E-17
4	2.529134280E-26	5.105793203E-26	89.9862636044938	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262406206E-01	5.935552775E-02	2.976091033E-16
1	4.322843525E-26	9.421147120E-26	89.9862636044939	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262390842E-01	5.935552784E-02	2.678682260E-16

Таблица 3.22 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 5, Тримаран, Корпуса Вигля 5 и 6, МКК, $F_{нч} = 0.33$, $2p/L = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму

MC	I_{SH}^2	I_{CH}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	HIF _L	fR _w
1	4.260374496E-06	6.550727924E-06	0	0.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00	9.983966131E-01	1.079376804E-05
4	2.373024458E-09	6.549669570E-06	1	1.745240644E-02	9.996954135E-01	1.000457054E+00	9.99996873E-01	9.983961249E-01	2.617808689E-05
2	4.258811006E-06	6.546493160E-06	2	3.489949670E-02	9.987820251E-01	1.001829748E+00	9.999987472E-01	9.983946589E-01	2.161536734E-05
4	4.256854140E-06	6.541194650E-06	3	5.233595624E-02	9.972609477E-01	1.004122691E+00	9.999971740E-01	9.983922117E-01	4.330041065E-05
2	4.254109850E-06	6.533767297E-06	4	6.975647374E-02	9.951340344E-01	1.007343597E+00	9.999949582E-01	9.983887772E-01	2.169906991E-05
4	4.250573440E-06	6.524201654E-06	5	8.715574275E-02	9.924038765E-01	1.011503342E+00	9.999920860E-01	9.983843470E-01	4.352410540E-05
2	4.246238854E-06	6.512485563E-06	6	1.045284633E-01	9.890738004E-01	1.016616029E+00	9.999885398E-01	9.983789103E-01	2.183927180E-05
4	4.241098652E-06	6.498604148E-06	7	1.218693434E-01	9.851478631E-01	1.022699092E+00	9.999842976E-01	9.983724535E-01	4.386174395E-05
2	4.235143994E-06	6.482539804E-06	8	1.391731010E-01	9.806308480E-01	1.029773410E+00	9.999793329E-01	9.983649608E-01	2.203702498E-05
4	4.228364615E-06	6.464272187E-06	9	1.564344650E-01	9.755282581E-01	1.037863452E+00	9.999736145E-01	9.983564132E-01	4.431585966E-05
2	4.220748794E-06	6.443778205E-06	10	1.736481777E-01	9.698463104E-01	1.046997448E+00	9.999671063E-01	9.983467894E-01	2.229381314E-05
4	4.212283325E-06	6.421032006E-06	11	1.908089954E-01	9.635919273E-01	1.057207586E+00	9.999597664E-01	9.983360649E-01	4.488985904E-05
2	4.202953477E-06	6.396004968E-06	12	2.079116908E-01	9.567727288E-01	1.068530241E+00	9.999515475E-01	9.983242121E-01	2.261156198E-05
4	4.192742956E-06	6.368665692E-06	13	2.249510543E-01	9.493970231E-01	1.081006242E+00	9.999423957E-01	9.983112006E-01	4.558804471E-05
2	4.181633860E-06	6.338979993E-06	14	2.419218956E-01	9.414737964E-01	1.094681162E+00	9.999322503E-01	9.982969961E-01	2.299265171E-05
4	4.169606630E-06	6.306910903E-06	15	2.588190451E-01	9.330127019E-01	1.109605666E+00	9.999210433E-01	9.982815611E-01	4.641564168E-05
2	4.156640000E-06	6.272418668E-06	16	2.756373558E-01	9.240240481E-01	1.125835889E+00	9.999086981E-01	9.982648543E-01	2.343993066E-05
4	4.142710934E-06	6.235460758E-06	17	2.923717047E-01	9.145187863E-01	1.143433872E+00	9.998951295E-01	9.982468302E-01	4.737882526E-05
2	4.127794574E-06	6.195991886E-06	18	3.090169944E-01	9.045084972E-01	1.162468045E+00	9.998802418E-01	9.982274392E-01	2.395672910E-05
4	4.111864166E-06	6.153964029E-06	19	3.255681545E-01	8.940053768E-01	1.183013781E+00	9.998639285E-01	9.982066269E-01	4.848474732E-05
2	4.094891001E-06	6.109326468E-06	20	3.420201433E-01	8.8302222216E-01	1.205154011E+00	9.998460708E-01	9.981843342E-01	2.454687131E-05
4	4.076844334E-06	6.062025837E-06	21	3.583679495E-01	8.715724127E-01	1.228979919E+00	9.998265359E-01	9.981604965E-01	4.974155722E-05
2	4.057691312E-06	6.012006199E-06	22	3.746065934E-01	8.596699002E-01	1.254591725E+00	9.998051760E-01	9.981350436E-01	2.521468362E-05
4	4.037396896E-06	5.959209125E-06	23	3.907311285E-01	8.473291852E-01	1.282099562E+00	9.997818258E-01	9.981078990E-01	5.115841139E-05
2	4.015923775E-06	5.903573817E-06	24	4.067366431E-01	8.345653032E-01	1.311624476E+00	9.997563009E-01	9.980789797E-01	2.596499501E-05

Таблица 3.22 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 5, Тримаран, Корпуса Виглея 5 и 6, МКК, $F_{nCH} = 0.33$, $2p/L = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму – продолжение.

4	3.99323288E-06	5.845037242E-06	4.226182617E-01	8.213938048E-01	1.343299538E+00	9.997283951E-01	9.980481952E-01	5.274546365E-05
2	3.969280328E-06	5.783534314E-06	4.383711468E-01	8.078307377E-01	1.377271115E+00	9.996978778E-01	9.980154470E-01	2.680312542E-05
4	3.944023263E-06	5.718998106E-06	4.539904997E-01	7.938926261E-01	1.413700292E+00	9.996644906E-01	9.979806628E-01	5.451382505E-05
2	3.917413846E-06	5.651360108E-06	4.694715628E-01	7.795964517E-01	1.452764502E+00	9.996279440E-01	9.979436227E-01	2.773485537E-05
4	3.889402127E-06	5.580550543E-06	4.848096202E-01	7.649596321E-01	1.494659352E+00	9.995879129E-01	9.979043033E-01	5.647547794E-05
2	3.859935373E-06	5.506498739E-06	5.000000000E-01	7.500000000E-01	1.539600718E+00	9.995440316E-01	9.978625319E-01	2.876636782E-05
4	3.828957985E-06	5.429133573E-06	5.150380749E-01	7.347357814E-01	1.587827117E+00	9.994958885E-01	9.978181581E-01	5.864312324E-05
2	3.796411431E-06	5.348383993E-06	5.299192642E-01	7.191855734E-01	1.639602416E+00	9.994430194E-01	9.977710175E-01	2.990415006E-05
4	3.762234180E-06	5.264179639E-06	5.446390350E-01	7.033683215E-01	1.695218929E+00	9.993848994E-01	9.977209305E-01	6.102993264E-05
2	3.726361655E-06	5.176451556E-06	5.591929035E-01	6.873032967E-01	1.755000964E+00	9.993209349E-01	9.976677010E-01	3.115483925E-05
4	3.688726199E-06	5.085133043E-06	5.735764364E-01	6.710100717E-01	1.819308890E+00	9.992504523E-01	9.976111141E-01	6.364916759E-05
2	3.649257069E-06	4.990160621E-06	5.877852523E-01	6.545084972E-01	1.888543820E+00	9.991726862E-01	9.975509344E-01	3.252498961E-05
4	3.607880448E-06	4.891475164E-06	6.018150232E-01	6.378186779E-01	1.963153011E+00	9.990867649E-01	9.974869033E-01	6.651361470E-05
2	3.564519503E-06	4.789023195E-06	6.156614753E-01	6.209609478E-01	2.043636109E+00	9.989916933E-01	9.974187370E-01	3.402073245E-05
4	3.519094478E-06	4.682758379E-06	6.293203910E-01	6.039558454E-01	2.130552383E+00	9.988863333E-01	9.973461228E-01	6.963477176E-05
2	3.471522843E-06	4.572643220E-06	6.427876097E-01	5.868240888E-01	2.224529146E+00	9.987693794E-01	9.972687161E-01	3.564729157E-05
4	3.421719507E-06	4.458651001E-06	6.560590290E-01	5.695865505E-01	2.326271560E+00	9.986393307E-01	9.971861362E-01	7.302169975E-05
2	3.369597111E-06	4.340767972E-06	6.691306064E-01	5.522642316E-01	2.436574112E+00	9.984944570E-01	9.970979620E-01	3.740830672E-05
4	3.315066413E-06	4.218995823E-06	6.819983601E-01	5.348782369E-01	2.556334072E+00	9.983327583E-01	9.970037268E-01	7.667943546E-05
2	3.258036782E-06	4.093354451E-06	6.946583705E-01	5.174497484E-01	2.686567334E+00	9.981519159E-01	9.969029121E-01	3.930490681E-05
4	3.198416838E-06	3.963885043E-06	7.071067812E-01	5.000000000E-01	2.828427125E+00	9.979492337E-01	9.967949409E-01	8.060683720E-05
2	3.136115241E-06	3.830653486E-06	7.193398003E-01	4.825502516E-01	2.983226171E+00	9.977215671E-01	9.966791696E-01	4.133446411E-05
4	3.071041670E-06	3.693754109E-06	7.313537016E-01	4.651217631E-01	3.152463079E+00	9.974652356E-01	9.965548785E-01	8.479371799E-05
2	3.003108029E-06	3.553313750E-06	7.431448255E-01	4.477357684E-01	3.337853831E+00	9.971759177E-01	9.964212610E-01	4.348895395E-05
4	2.932229899E-06	3.409496119E-06	7.547095802E-01	4.304134495E-01	3.541369556E+00	9.968485198E-01	9.962774109E-01	8.921711346E-05
2	2.858328302E-06	3.262506429E-06	7.660444431E-01	4.131759112E-01	3.765282014E+00	9.964770169E-01	9.961223070E-01	4.575284567E-05
4	2.781331794E-06	3.112596207E-06	7.771459615E-01	3.960441546E-01	4.012218614E+00	9.960542532E-01	9.959547954E-01	9.383654898E-05

Таблица 3.22 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 5, Тримаран, Корпуса Виглея 5 и 6, МКК, $F_{nCH} = 0.33$, $2p/L = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму – продолжение.

2	2.701178952E-06	2.960068196E-06	52	7.880107536E-01	3.790390522E-01	4.285229282E+00	9.955716949E-01	9.957735686E-01	4.810046884E-05
4	2.617821306E-06	2.805281186E-06	53	7.986355100E-01	3.621813221E-01	4.587868120E+00	9.950191206E-01	9.955771399E-01	9.858823039E-05
2	2.531226745E-06	2.648654582E-06	54	8.090169944E-01	3.454915028E-01	4.924293659E+00	9.943842318E-01	9.953638135E-01	5.049284327E-05
4	2.441383469E-06	2.490672439E-06	55	8.191520443E-01	3.289899283E-01	5.299392612E+00	9.936521594E-01	9.951316484E-01	1.033782074E-04
2	2.348304498E-06	2.331886622E-06	56	8.290375726E-01	3.126967033E-01	5.718933494E+00	9.928048355E-01	9.948784143E-01	5.287404325E-05
4	2.252032789E-06	2.172918680E-06	57	8.386705679E-01	2.966316785E-01	6.189758519E+00	9.918201884E-01	9.946015388E-01	1.080747601E-04
2	2.152646934E-06	2.014459920E-06	58	8.480480962E-01	2.808144266E-01	6.720024814E+00	9.906711036E-01	9.942980424E-01	5.516728220E-05
4	2.050267428E-06	1.857269112E-06	59	8.571673007E-01	2.652642186E-01	7.319509720E+00	9.893240745E-01	9.939644587E-01	1.125005030E-04
2	1.945063417E-06	1.702167168E-06	60	8.660254038E-01	2.500000000E-01	8.000000000E+00	9.877374358E-01	9.935967360E-01	5.727101421E-05
4	1.837259784E-06	1.550028138E-06	61	8.746197071E-01	2.350403679E-01	8.775791828E+00	9.858590346E-01	9.931901145E-01	1.164248338E-04
2	1.727144343E-06	1.401765880E-06	62	8.829475929E-01	2.204035483E-01	9.664338369E+00	9.836231338E-01	9.927389732E-01	5.905532054E-05
4	1.615074824E-06	1.258315903E-06	63	8.910065242E-01	2.061073739E-01	1.068709587E+01	9.809462618E-01	9.922366357E-01	1.195569582E-04
2	1.501485185E-06	1.120612129E-06	64	8.987940463E-01	1.921692623E-01	1.187063948E+01	9.777216000E-01	9.916751234E-01	6.035837590E-05
4	1.386890692E-06	9.895587331E-07	65	9.063077870E-01	1.786061952E-01	1.324814955E+01	9.738113254E-01	9.910448393E-01	1.215379522E-04
2	1.271891057E-06	8.659978426E-07	66	9.135454576E-01	1.654346968E-01	1.486141289E+01	9.690360662E-01	9.903341576E-01	6.098133503E-05
4	1.157170852E-06	7.506746641E-07	67	9.205048535E-01	1.526708148E-01	1.676354888E+01	9.631602434E-01	9.895288870E-01	1.219259608E-04
2	1.043496368E-06	6.442025492E-07	68	9.271838546E-01	1.403300998E-01	1.902276964E+01	9.558715049E-01	9.886115620E-01	6.067697437E-05
4	9.317081865E-07	5.470314827E-07	69	9.335804265E-01	1.284275873E-01	2.172763788E+01	9.467516047E-01	9.875604929E-01	1.201611254E-04
2	8.227089027E-07	4.594242572E-07	70	9.396926208E-01	1.169777784E-01	2.499452836E+01	9.352348316E-01	9.863484811E-01	5.912336277E-05
4	7.174458299E-07	3.814448755E-07	71	9.455185756E-01	1.059946232E-01	2.897838960E+01	9.205482699E-01	9.849410535E-01	1.154903092E-04
2	6.168888884E-07	3.129631035E-07	72	9.510565163E-01	9.549150281E-02	3.388854382E+01	9.016256554E-01	9.832940011E-01	5.587356466E-05
4	5.220041789E-07	2.536771902E-07	73	9.563047560E-01	8.548121372E-02	4.001234272E+01	8.769834544E-01	9.813498918E-01	1.068446081E-04
2	4.337235473E-07	2.031534069E-07	74	9.612616959E-01	7.597595192E-02	4.775136325E+01	8.445450430E-01	9.790330368E-01	5.029113864E-05
4	3.529094770E-07	1.608766034E-07	75	9.659258263E-01	6.698729811E-02	5.767814816E+01	8.014005027E-01	9.762420787E-01	9.273864951E-05
2	2.803129676E-07	1.263018106E-07	76	9.702957263E-01	5.852620357E-02	7.062760340E+01	7.435088625E-01	9.728388297E-01	4.154460846E-05

Таблица 3.23 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 5, Тримаран, Корпуса Вигля 5 и 6, МКК, $F_{нч} = 0.42$, $2p/L = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму

MC	I_{sh}^2	I_{ch}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	HIF _L	fR _w
1	4.79266284E-06	8.069421722E-06	0	0.00000000E+00	1.00000000E+00	1.00000000E+00	1.00000000E+00	9.993885029E-01	1.285421942E-05
4	4.792381510E-06	8.068587584E-06	1	1.745240644E-02	9.996954135E-01	1.000457054E+00	9.999998807E-01	9.993883166E-01	5.143590111E-05
2	4.791537011E-06	8.066083751E-06	2	3.489949670E-02	9.987820251E-01	1.001829748E+00	9.999995220E-01	9.993877574E-01	2.574650885E-05
4	4.790127661E-06	8.061905962E-06	3	5.233595624E-02	9.972609477E-01	1.004122691E+00	9.99989217E-01	9.993868237E-01	5.158836649E-05
2	4.788150672E-06	8.056047103E-06	4	6.975647374E-02	9.951340344E-01	1.007343597E+00	9.99980761E-01	9.993855135E-01	2.586108994E-05
4	4.785602129E-06	8.048497187E-06	5	8.715574275E-02	9.924038765E-01	1.011503342E+00	9.99969801E-01	9.993838233E-01	5.189478451E-05
2	2.687331423E-08	8.039243325E-06	6	1.045284633E-01	9.890738004E-01	1.016616029E+00	9.999956270E-01	9.993817492E-01	1.639007577E-05
4	4.778768979E-06	8.028269696E-06	7	1.218693434E-01	9.851478631E-01	1.022699092E+00	9.999940082E-01	9.993792859E-01	5.235815376E-05
2	4.774470738E-06	8.015557498E-06	8	1.391731010E-01	9.806308480E-01	1.029773410E+00	9.999921137E-01	9.993764273E-01	2.632502844E-05
4	4.769573628E-06	8.001084902E-06	9	1.564344650E-01	9.755282581E-01	1.037863452E+00	9.99899317E-01	9.993731663E-01	5.298303283E-05
2	4.764067776E-06	7.984826989E-06	10	1.736481777E-01	9.698463104E-01	1.046997448E+00	9.99874482E-01	9.993694947E-01	2.667895365E-05
4	4.757942025E-06	7.966755688E-06	11	1.908089954E-01	9.635919273E-01	1.057207586E+00	9.99846474E-01	9.993654032E-01	5.377561415E-05
2	4.751183892E-06	7.946839696E-06	12	2.079116908E-01	9.567727288E-01	1.068530241E+00	9.99815111E-01	9.993608812E-01	2.711859960E-05
4	4.743779515E-06	7.925044399E-06	13	2.249510543E-01	9.493970231E-01	1.081006242E+00	9.99780189E-01	9.993559170E-01	5.474382448E-05
2	4.735713606E-06	7.901331778E-06	14	2.419218956E-01	9.414737964E-01	1.094681162E+00	9.99741474E-01	9.993504978E-01	2.764838642E-05
4	4.726969384E-06	7.875660313E-06	15	2.588190451E-01	9.330127019E-01	1.109605666E+00	9.99698709E-01	9.993446090E-01	5.589745326E-05
2	4.717528517E-06	7.847984873E-06	16	2.756373558E-01	9.240240481E-01	1.125835889E+00	9.99651600E-01	9.993382349E-01	2.827370320E-05
4	4.707371045E-06	7.818256602E-06	17	2.923717047E-01	9.145187863E-01	1.143433872E+00	9.99599822E-01	9.993313583E-01	5.724831087E-05
2	4.696475300E-06	7.786422800E-06	18	3.090169944E-01	9.045084972E-01	1.162468045E+00	9.99543011E-01	9.993239600E-01	2.900099493E-05
4	4.684817826E-06	7.752426786E-06	19	3.255681545E-01	8.940053768E-01	1.183013781E+00	9.999480759E-01	9.993160194E-01	5.881041845E-05
2	4.672373278E-06	7.716207767E-06	20	3.420201433E-01	8.830222216E-01	1.205154011E+00	9.999412612E-01	9.993075139E-01	2.983786570E-05
4	4.659114324E-06	7.677700695E-06	21	3.583679495E-01	8.715724127E-01	1.228979919E+00	9.999338065E-01	9.992984189E-01	6.060023147E-05
2	4.645011536E-06	7.636836113E-06	22	3.746065934E-01	8.596699002E-01	1.254591725E+00	9.999256553E-01	9.992887075E-01	3.079319918E-05
4	4.630033264E-06	7.593540007E-06	23	3.907311285E-01	8.473291852E-01	1.282099562E+00	9.999167445E-01	9.992783506E-01	6.263689817E-05
2	4.614145513E-06	7.547733645E-06	24	4.067366431E-01	8.345653032E-01	1.311624476E+00	9.999070037E-01	9.992673163E-01	3.187729674E-05
4	4.597311801E-06	7.499333418E-06	25	4.226182617E-01	8.213938048E-01	1.343299538E+00	9.998963541E-01	9.992555703E-01	6.494255383E-05
2	4.579493006E-06	7.448250682E-06	26	4.383711468E-01	8.078307377E-01	1.377271115E+00	9.998847079E-01	9.992430748E-01	3.31020343E-05

Таблица 3.23 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 5, Тримаран, Корпуса Виглея 5 и 6, МКК, $F_{nCH} = 0.42$, $2p/L = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму – продолжение.

4	4.560647209E-06	7.394391600E-06	27	4.539904997E-01	7.938926261E-01	1.413700292E+00	9.998719662E-01	9.992297891E-01	6.754264974E-05
2	4.540729519E-06	7.337656987E-06	28	4.694715628E-01	7.795964517E-01	1.4522764502E+00	9.998580186E-01	9.992156688E-01	3.448103052E-05
4	4.519691883E-06	7.277942168E-06	29	4.848096202E-01	7.649596321E-01	1.494659352E+00	9.998427409E-01	9.992006653E-01	7.046631294E-05
2	4.497482891E-06	7.215136846E-06	30	5.000000000E-01	7.500000000E-01	1.539600718E+00	9.998259935E-01	9.991847260E-01	3.602984171E-05
4	4.474047563E-06	7.149124987E-06	31	5.150380749E-01	7.347357814E-01	1.587827117E+00	9.998076192E-01	9.991677933E-01	7.374672857E-05
2	4.449327121E-06	7.079784732E-06	32	5.299192642E-01	7.191855734E-01	1.639602416E+00	9.997874408E-01	9.991498044E-01	3.776614727E-05
4	4.423258750E-06	7.006988339E-06	33	5.446390350E-01	7.033683215E-01	1.695218929E+00	9.997652578E-01	9.991306909E-01	7.742152894E-05
2	4.395775342E-06	6.930602167E-06	34	5.591929035E-01	6.873032967E-01	1.755000964E+00	9.997408435E-01	9.991103777E-01	3.970994566E-05
4	4.36805228E-06	6.850486710E-06	35	5.735764364E-01	6.710100717E-01	1.819308890E+00	9.997139405E-01	9.990887827E-01	8.153316231E-05
2	4.336271897E-06	6.766496701E-06	36	5.877852523E-01	6.545084972E-01	1.888543820E+00	9.996842566E-01	9.990658161E-01	4.188372530E-05
4	4.304093700E-06	6.678481295E-06	37	6.018150232E-01	6.378186779E-01	1.963153011E+00	9.996514586E-01	9.990413791E-01	8.612919735E-05
2	4.270183546E-06	6.586284348E-06	38	6.156614753E-01	6.209609478E-01	2.043636109E+00	9.996151665E-01	9.990153632E-01	4.431258845E-05
4	4.234448588E-06	6.489744827E-06	39	6.293203910E-01	6.039558454E-01	2.130552383E+00	9.995749452E-01	9.989876489E-01	9.126249267E-05
2	4.196789899E-06	6.388697365E-06	40	6.427876097E-01	5.868240888E-01	2.224529146E+00	9.995302959E-01	9.989581046E-01	4.702428348E-05
4	4.157102158E-06	6.282972995E-06	41	6.560590290E-01	5.695865505E-01	2.326271560E+00	9.994806449E-01	9.989265848E-01	9.699112286E-05
2	4.115273324E-06	6.172400108E-06	42	6.691306064E-01	5.522642316E-01	2.436574112E+00	9.994253307E-01	9.988929285E-01	5.004907809E-05
4	4.071184340E-06	6.056805661E-06	43	6.819983601E-01	5.348782369E-01	2.556334072E+00	9.993635887E-01	9.988569573E-01	1.033778950E-04
2	4.024708840E-06	5.936016712E-06	44	6.946583705E-01	5.174497484E-01	2.686567334E+00	9.992945321E-01	9.988184730E-01	5.341937182E-05
4	3.975712905E-06	5.809862313E-06	45	7.071067812E-01	5.000000000E-01	2.828427125E+00	9.992171296E-01	9.987772552E-01	1.104892073E-04
2	3.924054863E-06	5.678175846E-06	46	7.193398003E-01	4.825502516E-01	2.983226171E+00	9.991301780E-01	9.987330575E-01	5.716889713E-05
4	3.869585160E-06	5.540797873E-06	47	7.313537016E-01	4.651217631E-01	3.152463079E+00	9.990322689E-01	9.986856050E-01	1.183928861E-04
2	3.812146328E-06	5.397579593E-06	48	7.431448255E-01	4.477357684E-01	3.337853831E+00	9.989217476E-01	9.986345890E-01	6.133128848E-05
4	3.751573091E-06	5.248386994E-06	49	7.547095802E-01	4.304134493E-01	3.541369556E+00	9.987966637E-01	9.985796631E-01	1.271544677E-04
2	3.687692625E-06	5.093105822E-06	50	7.660444431E-01	4.131759112E-01	3.765282014E+00	9.986547086E-01	9.985204364E-01	6.593770480E-05
4	3.620325063E-06	4.931647470E-06	51	7.771459615E-01	3.960441546E-01	4.012218614E+00	9.984931398E-01	9.984564676E-01	1.368311878E-04
2	3.549284265E-06	4.763955924E-06	52	7.880107536E-01	3.790390522E-01	4.285229282E+00	9.983086845E-01	9.983872562E-01	7.101306638E-05
4	3.474378963E-06	4.590015880E-06	53	7.986355100E-01	3.621813221E-01	4.587868120E+00	9.980974207E-01	9.983122333E-01	1.474626473E-04
2	3.395414359E-06	4.409862152E-06	54	8.090169944E-01	3.454915028E-01	4.924293659E+00	9.978546262E-01	9.982307497E-01	7.657031818E-05

Таблица 3.23 – Характерные результаты расчета волнового сопротивления судна R_w [N], Исследование 5, Тримаран, Корпуса Виглея 5 и 6, МКК, $F_{nCH} = 0.42$, $2p/L = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму – продолжение.

4	3.312194295E-06	4.223590482E-06	55	8.191520443E-01	3.28989283E-01	5.299392612E+00	9.975745872E-01	9.981420621E-01	1.590568247E-04
2	3.224524135E-06	4.031369797E-06	56	8.290375726E-01	3.126967033E-01	5.718933494E+00	9.972503550E-01	9.980453164E-01	8.260197433E-05
4	3.132214510E-06	3.833455939E-06	57	8.386705679E-01	2.966316785E-01	6.189758519E+00	9.968734321E-01	9.979395272E-01	1.715698090E-04
2	3.035086135E-06	3.630206768E-06	58	8.480480962E-01	2.808144266E-01	6.720024814E+00	9.964333673E-01	9.978233552E-01	8.906808693E-05
4	2.932975894E-06	3.422098420E-06	59	8.571673007E-01	2.652642186E-01	7.319509720E+00	9.959172276E-01	9.976960638E-01	1.848775258E-04
2	2.825744452E-06	3.209742307E-06	60	8.660254038E-01	2.500000000E-01	8.000000000E+00	9.953089051E-01	9.975555074E-01	9.587982760E-05
4	2.713285637E-06	2.993902173E-06	61	8.746197071E-01	2.350403679E-01	8.775791828E+00	9.945881985E-01	9.974000575E-01	1.987381117E-04
2	2.595537885E-06	2.775510180E-06	62	8.829475929E-01	2.204035483E-01	9.664338369E+00	9.937295875E-01	9.972275572E-01	1.028782703E-04
4	2.472497953E-06	2.555680552E-06	63	8.910065242E-01	2.061073739E-01	1.068709587E+01	9.927005788E-01	9.970354432E-01	2.127449482E-04
2	2.344237127E-06	2.335718785E-06	64	8.987940463E-01	1.921692623E-01	1.187063948E+01	9.914594563E-01	9.968206509E-01	1.098089803E-04
4	2.210919964E-06	2.117123842E-06	65	9.063077870E-01	1.786061952E-01	1.324814955E+01	9.899521839E-01	9.965794919E-01	2.262731510E-04
2	2.072825449E-06	1.901580154E-06	66	9.135454576E-01	1.654346968E-01	1.486141289E+01	9.881080988E-01	9.963074952E-01	1.162947579E-04
4	1.930370111E-06	1.690935806E-06	67	9.205048535E-01	1.526708148E-01	1.676354888E+01	9.858338487E-01	9.959991996E-01	2.384261497E-04
2	1.784132173E-06	1.487163130E-06	68	9.271838546E-01	1.403300998E-01	1.902276964E+01	9.830047517E-01	9.956478780E-01	1.218105444E-04
4	1.634875210E-06	1.292298430E-06	69	9.335804265E-01	1.284275873E-01	2.172763788E+01	9.794523182E-01	9.952451691E-01	2.479901140E-04
2	1.483568966E-06	1.108359016E-06	70	9.396926208E-01	1.169777784E-01	2.499452836E+01	9.749459800E-01	9.947805766E-01	1.256625076E-04
4	1.331404113E-06	9.372386566E-07	71	9.455185756E-01	1.059946232E-01	2.897838960E+01	9.691659420E-01	9.942407809E-01	2.533903494E-04
2	1.179796954E-06	7.805871320E-07	72	9.510565163E-01	9.549150281E-02	3.388854382E+01	9.616622360E-01	9.936086766E-01	1.269585662E-04
4	1.030379579E-06	6.396858076E-07	73	9.563047560E-01	8.548121372E-02	4.001234272E+01	9.517920173E-01	9.928620055E-01	2.525913046E-04
2	8.849713796E-07	5.153380771E-07	74	9.612616959E-01	7.597595192E-02	4.775136325E+01	9.386221245E-01	9.919171376E-01	1.245173071E-04
4	7.455293412E-07	4.077991042E-07	75	9.659258263E-01	6.698729811E-02	5.767814816E+01	9.207756864E-01	9.908973403E-01	2.427765909E-04
2	6.140772371E-07	3.167699845E-07	76	9.702957263E-01	5.852620357E-02	7.062760340E+01	8.961885258E-01	9.895859609E-01	1.16609950E-04
4	4.926165840E-07	2.414729148E-07	77	9.743700648E-01	5.060297685E-02	8.784881363E+01	8.617225953E-01	9.879619418E-01	2.196102465E-04
2	3.830219968E-07	1.808031388E-07	78	9.781476007E-01	4.322727118E-02	1.112662033E+02	8.125662440E-01	9.859176260E-01	1.005164416E-04
4	2.869169747E-07	1.35233905E-07	79	9.816271834E-01	3.640807272E-02	1.439472807E+02	7.413756615E-01	9.832947889E-01	1.764777358E-04
2	2.055153480E-07	9.844358679E-08	80	9.848077530E-01	3.015368961E-02	1.909806249E+02	6.373631555E-01	9.798532892E-01	7.250738269E-05

Таблица 3.24 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9432579978839$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 1, Тримаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $2p/L_{CH} = 0.216$, $LS = 0$ м, $F_{nCH} = 0.424$

MC	I_{SH}^2	I_{CH}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	$R_w [N]$
1	4.904234015E-28	1.937866420E-27	89.943257997883500	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043657E-01	2.578480994E-15
4	2.915888544E-28	1.121261130E-27	89.943257997883600	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043560E-01	3.000471165E-15
2	1.250543739E-28	5.296367045E-28	89.943257997883700	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043450E-01	6.951840969E-16
4	2.872898074E-29	1.557931675E-28	89.943257997883800	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043340E-01	3.918698934E-16
2	2.818885889E-31	3.232557957E-30	89.943257997883900	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043230E-01	3.731816996E-18
4	4.092800356E-29	5.293807060E-29	89.943257997884000	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043120E-01	1.993434826E-16
2	1.332394725E-28	3.086991143E-28	89.943257997884100	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826043023E-01	4.692727215E-16
4	3.017886596E-28	8.032804932E-28	89.943257997884200	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826042913E-01	2.346836499E-15
1	5.745680816E-28	1.499621760E-27	89.943257997884300	9.999995399E-01	9.202914766E-07	1.132692175E+09	9.826042789E-01	2.202479524E-15

Таблица 3.25 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9774773063894$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 2, Тримаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $2p/L_{CH} = 0.288$, $LS = 0$ м, $F_{nCH} = 0.509$

MC	I_{SH}^2	I_{CH}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF _T	$R_w [N]$
1	8.541592929E-27	2.006192163E-26	89.9774773063890	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238279982E-01	2.569929898E-13
4	4.624208714E-27	1.131618359E-26	89.9774773063891	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238284302E-01	2.864383127E-13
2	1.903536951E-27	5.132846380E-27	89.9774773063892	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238288621E-01	6.321961177E-14
4	3.660251677E-28	1.348638552E-27	89.9774773063893	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238292940E-01	3.081140592E-14
2	2.784618617E-29	3.869807231E-29	89.9774773063894	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238297260E-01	5.978791091E-16
4	7.101729567E-28	8.232356464E-28	89.9774773063895	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238301039E-01	2.755435902E-14
2	2.608905623E-27	4.039504668E-27	89.9774773063896	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238305358E-01	5.973392177E-14
4	5.710268261E-27	9.682507274E-27	89.9774773063897	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238309678E-01	2.765988534E-13
1	9.992220927E-27	1.781334649E-26	89.9774773063898	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	8.238313997E-01	2.498247336E-13

Таблица 3.26 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9774773063894$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 3, Тримаран, МКК, усовersh. формула Мичеля-Виглея, $2p/L_{\text{CH}} = 0.216$, $LS = 0.35$ м в корму, $F_{\text{нCH}} = 0.509$

MC	I_{SH}^2	I_{CH}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	HIF_L	$R_w [N]$
1	8.541592929E-27	2.006192163E-26	89.9774773063890	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	9.767992084E-01	1.583990167E-01	4.826501203E-14
4	4.624208714E-27	1.131618359E-26	89.9774773063891	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	9.767990804E-01	1.583990168E-01	5.379500649E-14
2	1.903536951E-27	5.132846380E-27	89.9774773063892	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	9.767989524E-01	1.583990169E-01	1.187305276E-14
4	3.660251677E-28	1.348638552E-27	89.9774773063893	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	9.767988244E-01	1.583990169E-01	5.786577903E-15
2	2.784618617E-29	3.869807231E-29	89.9774773063894	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	9.767986964E-01	1.583990170E-01	1.122854239E-16
4	7.101729567E-28	8.232336464E-28	89.9774773063895	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	9.767985844E-01	1.583990171E-01	5.174877436E-15
2	2.608905623E-27	4.039504668E-27	89.9774773063896	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	9.767984564E-01	1.583990172E-01	1.121838912E-14
4	5.710268261E-27	9.682507274E-27	89.9774773063897	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	9.767983283E-01	1.583990173E-01	5.194689121E-14
1	9.992220927E-27	1.781334649E-26	89.9774773063898	9.999999227E-01	1.545237968E-07	1.646292289E+10	9.767982003E-01	1.583990173E-01	4.691852336E-14

Таблица 3.27 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9862636044935$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 4, Тримаран, МКК, усовersh. формула Мичеля-Виглея, $2p/L_{\text{CH}} = 0.288$, $LS = 0.35$ м в корму, $F_{\text{нCH}} = 0.594$

MC	I_{SH}^2	I_{CH}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	HIF_L	$R_w [N]$
1	3.111582909E-26	1.083716554E-25	89.9862636044931	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262511830E-01	5.935552715E-02	3.308184230E-14
4	1.626819620E-26	6.190659484E-26	89.9862636044932	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262496466E-01	5.935552723E-02	7.416145074E-14
2	6.208660755E-27	2.815434811E-26	89.9862636044933	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262481103E-01	5.935552732E-02	1.629932907E-14
4	8.975507122E-28	7.596602345E-27	89.9862636044934	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262465739E-01	5.935552741E-02	8.057970501E-15
2	3.508684267E-28	2.717040064E-28	89.9862636044935	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262450376E-01	5.935552749E-02	2.952993787E-16
4	3.795685495E-27	4.135515040E-27	89.9862636044936	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262436933E-01	5.935552757E-02	7.523830332E-15
2	1.219011722E-26	2.103290887E-26	89.9862636044937	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262421569E-01	5.935552766E-02	1.575818902E-14
4	2.529134280E-26	5.105793203E-26	89.9862636044938	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262406206E-01	5.935552775E-02	7.242676407E-14
1	4.322843525E-26	9.421147120E-26	89.9862636044939	9.999999713E-01	5.747782165E-08	7.256873444E+10	2.262390842E-01	5.935552784E-02	6.518896294E-14

Таблица 3.28 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9507258931352$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 5, Тримаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $2p/L_{\text{CH}} = 0.4$, $LS = 0.61\text{м}$ в корму, $F_{\text{нCH}} = 0.33$

MC	I_{SH}^2	I_{CH}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	HIF_L	$R_w [N]$
1	8.101714839E-28	8.179580966E-26	89.95072589313480	9.999996302E-01	7.395919070E-07	1.572214418E+09	1.939308982E-01	7.264825070E-01	1.480240504E-14
4	4.370551230E-28	4.908221040E-26	89.95072589313490	9.999996302E-01	7.395919070E-07	1.572214418E+09	1.939307567E-01	7.264825071E-01	3.549397661E-14
2	1.824316375E-28	2.439247762E-26	89.95072589313500	9.999996302E-01	7.395919070E-07	1.572214418E+09	1.939306153E-01	7.264825072E-01	8.807285498E-15
4	3.761103426E-29	8.390418960E-27	89.95072589313510	9.999996302E-01	7.395919070E-07	1.572214418E+09	1.939304738E-01	7.264825073E-01	6.040959210E-15
2	1.962488847E-30	7.086747657E-28	89.95072589313520	9.999996302E-01	7.395919070E-07	1.572214418E+09	1.939303323E-01	7.264825074E-01	2.546815531E-16
4	6.137286425E-29	9.307015278E-28	89.95072589313530	9.999996302E-01	7.395919070E-07	1.572214418E+09	1.939302085E-01	7.264825075E-01	7.110882072E-16
2	2.367260417E-28	9.081331853E-27	89.95072589313540	9.999996302E-01	7.395919070E-07	1.572214418E+09	1.939300670E-01	7.264825075E-01	3.339445259E-15
4	5.219188447E-28	2.584656797E-26	89.95072589313550	9.999996302E-01	7.395919070E-07	1.572214418E+09	1.939299255E-01	7.264825076E-01	1.890008735E-14
1	9.206907043E-28	5.113728275E-26	89.95072589313560	9.999996302E-01	7.395919070E-07	1.572214418E+09	1.939297840E-01	7.264825077E-01	9.32836547E-15

Таблица 3.29 – Характерный конечный корень $\theta_{\text{rmax}} = 89.9610471677195$ и функция формы $R_w [N]$, Исследование 6, Тримаран, МКК, усоверш. формула Мичеля-Виглея, $2p/L_{\text{CH}} = 0.4$, $LS = 0.61$ м в корму, $F_{\text{нCH}} = 0.42$

MC	I_{SH}^2	I_{CH}^2	θ	$\sin\theta$	$\cos^2\theta$	$\sec^3\theta$	HIF_T	HIF_L	$R_w [N]$
1	8.495298788E-28	2.915962320E-26	89.96104716771910	9.999997689E-01	4.622029895E-07	3.182371488E+09	8.762202014E-01	6.050812719E-02	5.058300303E-15
4	4.662007088E-28	1.727426580E-26	89.96104716771920	9.999997689E-01	4.622029895E-07	3.182371488E+09	8.762200540E-01	6.050812723E-02	5.980614773E-15
2	1.976049756E-28	8.463959998E-27	89.96104716771930	9.999997689E-01	4.622029895E-07	3.182371488E+09	8.762199066E-01	6.050812728E-02	1.459980625E-15
4	5.401241802E-29	2.718636681E-27	89.96104716771940	9.999997689E-01	4.622029895E-07	3.182371488E+09	8.762197777E-01	6.050812732E-02	9.347071536E-16
2	4.730559097E-32	3.168626442E-28	89.96104716771950	9.999997689E-01	4.622029895E-07	3.182371488E+09	8.762196304E-01	6.050812736E-02	5.341785725E-17
4	6.063639201E-29	4.831699394E-28	89.96104716771960	9.999997689E-01	4.622029895E-07	3.182371488E+09	8.762194830E-01	6.050812741E-02	1.833262991E-16
2	2.360265415E-28	3.742485186E-27	89.96104716771970	9.999997689E-01	4.622029895E-07	3.182371488E+09	8.762193357E-01	6.050812745E-02	6.706116375E-16
4	5.268004478E-28	1.014192618E-26	89.96104716771980	9.999997689E-01	4.622029895E-07	3.182371488E+09	8.762191883E-01	6.050812750E-02	3.596606733E-15
1	9.336501211E-28	1.967345069E-26	89.96104716771990	9.999997689E-01	4.622029895E-07	3.182371488E+09	8.762190409E-01	6.050812754E-02	1.736749561E-15