

К РАСЧЁТУ ОСТАТОЧНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СУДНА

Готман Ада Шоломовна

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теории и устройства корабля

Сибирский государственный университет водного транспорта

630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33

тел. (383) 222-64-68; e-mail: ada.gotman@yandex.ru

Титов Михаил Анатольевич

Старший преподаватель кафедры теории и устройства корабля

Сибирский государственный университет водного транспорта

630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33

тел. (383) 221-47-51, e-mail: ktuk@nsawt.ru

Аннотация

Работа выполнена для разработки методики расчёта остаточного сопротивления судна по заданному теоретическому чертежу. В отличие от волнового сопротивления остаточное сопротивление легче сравнивать с экспериментом, так как оно получается просто путём вычитания из полного сопротивления составляющей трения, которая с достаточной точностью получается по экстраполяторам. В данной работе остаточное сопротивление рассматривается как результат взаимодействия вихреобразования и корабельных волн.

Для получения остаточного сопротивления использованы гидродинамические особенности потока вокруг движущегося с постоянной скоростью водоизмещающего судна. Вязкий поток вокруг движущегося судна можно разделён на следующие зоны: 1) вихревая зона, создаваемая подпорными волнами, 2) пограничный слой, прилегающий к корпусу судна, 3) попутный поток за кормой, 4) турбулентный пограничный слой под волновой поверхностью, который образуется, благодаря градиенту скорости. В статье показано, что пограничный слой и попутный поток не оказывают никакого воздействия на корабельные волны. Только вихревая зона подпорных волн и подповерхностный турбулентный слой влияют на корабельные волны.

Расчёт остаточного сопротивления выполняется по интегралу Мичелла, в который вводятся две поправки. Одна поправка учитывает влияние турбулентного подповерхностного слоя и вводится только в интерференционную часть интеграла Мичелла. Вторая поправка учитывает, что вихревая зона подпорных волн сдвигает носовую систему корабельных волн в корму, что изменяет расчетный угол входа. В результате получено хорошее согласование расчётной кривой с экспериментальной кривой остаточного сопротивления в диапазоне чисел Фруда $0,15 < Fr < 0,31$ для 17 моделей. Сравнение расчётов с экспериментом подтверждает правильность понимания влияния вязкости на корабельные волны движущегося судна и даёт верный путь для разработки практического метода расчёта остаточного сопротивления водоизмещающих судов.

Ключевые слова Остаточное сопротивление, водоизмещающие суда, сдвиг носовых волн, турбулентный подповерхностный слой.

Abstract

This work has been done to receive a method of calculating residual ship resistance for a given theoretical drawing. In contrast to wave resistance, residual resistance is easier to compare with experiment, since it is obtained simply by subtracting frictional resistance from the total resistance, which with sufficient accuracy we obtain by extrapolators. In this work the residual resistance is considering as a result of the interaction of vortex formation and ship waves.

To receive the residual resistance we use hydrodynamic features of the flow around a moving displacement vessel at a constant speed. The viscosity flow around a moving vessel can be divided into the following zones: 1) vortex zone created by the retaining (shock) waves, 2) the boundary layer adjacent to the ship hull, 3) wake, 4) the subsurface turbulent layer, which is the result of the velocity gradient under a free wave surface. The article shows that the boundary layer and the wake do not affect the ship waves. Only vortex zone of the retaining (shock) waves, and subsurface turbulent layer affect the ship waves.

The calculation of the residual resistance is performed by Michell's integral, into which two corrections are introduced. One correction takes into account the effect of the turbulent subsurface and is introduced only in the interference part of Michell's integral. The second correction takes into account that the vortex zone in the nose shifts ship waves to the stern, what changes the calculated angle of entry. The result gives a good correlation between the calculated curve with the experimental curve of residual resistance in the range of Froude numbers $0,15 < Fr < 0,31$ for 17 different models. Comparison of calculations with experimental data confirms the understanding of the effect of viscosity on the ship waves of a moving vessel and gives a sure way to develop a practical method for calculating the residual resistance of displacement ships.

Key words: the residual resistance, displacement vessels, shift bow waves, turbulent subsurface.

Введение

Данная статья является продолжением статьи [8], в которой впервые было указано, что влияние вязкости на корабельные волны заключается в образовании пограничного подповерхностного слоя и сдвига подпорными волнами носовой системы волн. Взаимодействие вихрей и корабельных волн создаёт сопротивление, которое со времён Фруда называется остаточным (остаток от вычета из полного сопротивления составляющей трения). Юмор ситуации в том, что сопротивление трения, создаваемое невидимым пограничным слоем, достаточно точно определяется разными экстраполяторами, а вихри и волны вокруг движущегося судна хорошо видны, но доступной



Рис. 1. На фотографии видно, что начало носовой системы волн сдвинуто в корму

методики расчёта сопротивления, вызванного этой великолепной картиной, до сих пор нет. Например, на рис. 1 хорошо видно, как носовые вихри отодвигают вершину кельвиновских волн в корму. Таким образом, связанный с вязкостью поток вокруг движущегося судна можно разделить на следующие зоны: 1) вихревая зона, создаваемая подпорными волнами, 2) пограничный слой, прилегающий к корпусу судна, 3) попутный поток за кормой, 4) пограничный слой под волновой поверхностью за счёт градиента скорости.

1. Особенности влияния вязкости на волновое сопротивление

Для расчёта остаточного сопротивления необходимо знать, как влияют на корабельные волны каждая из вязкостных зон. Покажем, что пограничный слой и попутный поток не влияют на

корабельные волны на основании следующих экспериментов. Во-первых, используем эксперимент Г.Вейнблума, Дж.Кендрика и М.Тодда [5], в котором проверялось допущение Мичелла о малости относительного удлинения с моделью длиной 6м и отношением длины к ширине 36,7. В результате этого эксперимента получена кривая остаточного сопротивления (рис. 2), которая на малых числах Фруда от 0,12 до 0,36 полностью совпадает с кривой интеграла Мичелла со всеми её горбами и впадинами. Понятно, что у шестиметровой модели образуется пограничный слой большой ширины. Если бы пограничный слой влиял на корабельные волны, то это непременно сказалось бы на кривой остаточного сопротивления. Такой же эксперимент и с той же целью, но с моделью, у которой отношение длины к ширине равнялось 20, выполнил С.Шарма [6]. Результат получился таким же.

Следующий эксперимент для проверки влияния пограничного слоя на волновое сопротивление выполнил в том же году, что и С.Шарма, японский учёный Е.Баба [1]. Е.Баба для увеличения ширины пограничного слоя увеличивал шероховатость поверхности модели, и таким путём проверял, как увеличение ширины пограничного слоя влияет на волновое сопротивление. Е.Баба пишет: «В результате увеличения шероховатости полное сопротивление, измеренное динамометром, возросло на 50 процентов. Волновое сопротивление, полученное из волнового анализа, было слегка меньше, чем для гладкой модели. Разница, однако, была пренебрежимо малой по сравнению с разницей в полном сопротивлении. Это доказывает, что влияние вязкого потока на

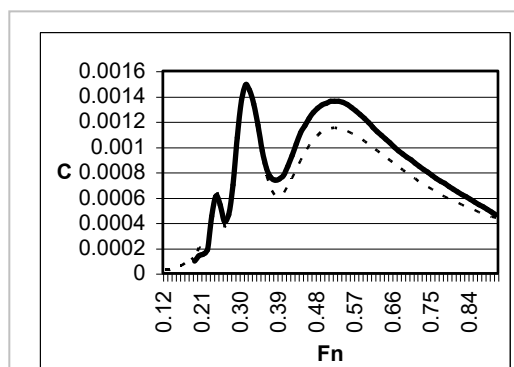


Рис.2 Эксперимент Г.Вейнблума, Дж.Кендрика и М.Тодда (сплошной линией показана экспериментальная кривая).

потенциальный поток довольно мало».

В 1989 году был выполнен эксперимент с тандемом стоек [7], которые при равномерном движении создавали две кельвиновские системы волн. Несмотря на отсутствие корпуса судна, кривая сопротивления тандема стоек имела такой же характер, какой обычно имеют кривые остаточного сопротивления моделей водоизмещающих судов. Следовательно, влияние вязкости связано с тем, что происходит на форштевне. Итак, на корабельные волны не влияют ни пограничный слой, ни попутный поток, а только вихревая зона, которая, как показали Х.Мията и Т.Инуи [2,3], образуется за ударными волнами. Эта вихревая зона отодвигает носовую систему волн, потому что волновое движение потенциально, а вихревое и потенциальное движения не могут существовать в одном пространстве. Таким образом, взаимное влияние вихревого и волнового сопротивления заключается в том, что из-за наличия вихревой зоны вершина носовой волновой системы находится не на форштевне, а в точке, находящейся дальше в корму. Отсюда можно объяснить причину расхождения кривой Мичелла с кривой остаточного сопротивления: в интеграле Мичелла в расчёт входит угол входа ватерлиний на форштевне, а не там, где действительно находится вершина волновой системы. Кроме сдвига волнообразующей точки носовой волновой системы, влияние вязкости жидкости проявляется в образовании под волновой поверхностью пограничного турбулентного слоя.

2. Расчёт остаточного сопротивления

Расчёт остаточного сопротивления основан на описанном выше понимании влияния вязкости на волнообразование. Для того чтобы расчётная кривая остаточного сопротивления совпала с экспериментальной кривой, вводятся две поправки: одна, учитывающая наличие под волновой поверхностью турбулентного пограничного слоя, а вторая, учитывающая изменение угла наклона касательной к поверхности корпуса судна в том месте, куда сдвинулась волнообразующая точка носовой системы волн. Первая поправка вводится по формуле

$$k_{\text{exp}} = \exp(v_{\text{turb}} / (\sqrt{g} \cdot L^{1,5} \cdot Fr^5)) \quad (1)$$

Эта поправка входит только в интерференционную часть интеграла Мичелла. Объясняется это тем, что сначала возникают волны, т.е. действует та сила, которая описывается фундаментальной (главной) частью интеграла Мичелла, а только потом после деформации свободной поверхности развивается подповерхностный пограничный слой и подавляет высоты волн носовой системы, которые интерферируют с кормовой волновой системой. Расчёты для разных моделей показали, что экспоненциальная поправка (1), за редким исключением, меняется в пределах $0,04 \leq k_{\text{exp}} \leq 0,1$, но для большинства

взятых для анализа моделей Г.Вейнблума и В.Виглея она равна 0,08. К сожалению, в формуле (1) коэффициент k_{exp} является размерной величиной, что важно учитывать при выборе величины турбулентной вязкости v_{turb} . Для того, чтобы использовать формулу (1) нужно просто сделать аффинное преобразование и привести все размеры расчётной модели к длине примерно 4,5-5,0 м. В этом случае можно принять $v_{\text{turb}} \approx 0,08$.

Для учёта сдвига использована новая форма интеграла Мичелла в виде [6]:

$$R_w = \frac{4\rho g^2}{\pi c^2} \left(\frac{B}{2}\right) (I_1 + I_2), \quad (2)$$

$$I_1 = \int_0^{\pi/2} J_4^2(p) \cdot F_1(k) \frac{d\theta}{\cos^3 \theta},$$

$$I_2 = 2 \int_0^{\pi/2} J_4^2(p) \cdot (F_2(k) \cos 2k + F_3(k) \sin 2k) \frac{d\theta}{\cos^3 \theta}, \quad (3)$$

$$F_1(k) = k^{-2} [G_{bo}^2 + k^{-2} G_{b1}^2 + G_{so}^2 + k^{-2} G_{s1}^2],$$

$$F_2(k) = k^{-2} [G_{bo} G_{so} + k^{-2} G_{b1} G_{s1}], \quad (4)$$

$$F_3(k) = k^{-3} [G_{bo} G_{s1} - G_{b1} G_{so}].$$

Здесь индексы bo и $b1$ относятся к носовой части корпуса, а индексы so и $s1$ относятся - к кормовой. Функции G_{bo} , G_{b1} , G_{so} , G_{s1} зависят от производных уравнения поверхности корпуса $y = b \cdot f(x, z)$, взятых в оконечностях на форштевне и ахтерштевне. Функции G_{bo} , G_{b1} , G_{so} , G_{s1} записываются в виде

$$G_{b1} = g'(1) - g'''(1)k^{-2} + g^V(1)k^{-4} - \dots (-1)^{r+1} g^{(2r-1)}(1)k^{-(2r-2)},$$

$$G_{bo} = g(1) - g''(1)k^{-2} + g^{IV}(1)k^{-4} \dots$$

$$\begin{cases} (-1)^r g^{(2r-2)}(1)k^{-2r}, & \text{а́ñëë } m = 2r + 1, \\ (-1)^{r-1} g^{(2r)}(1)k^{-(2r-2)}, & \text{а́ñëë } m = 2r, \end{cases}$$

$$G_{s1} = g'(-1) - g'''(-1)k^{-2} + g^V(-1)k^{-4} - \dots (-1)^{r+1} g^{(2r-1)}(-1)k^{-(2r-2)},$$

$$G_{so} = g(-1) - g''(-1)k^{-2} + g^{IV}(-1)k^{-4} \dots \quad (5)$$

$$\begin{cases} (-1)^r g^{(2r-2)}(-1)k^{-2r}, & \text{а́ñëë } m = 2r + 1, \\ (-1)^{r-1} g^{(2r)}(-1)k^{-(2r-2)}, & \text{а́ñëë } m = 2r, \end{cases}$$

Угол входа отражает первая производная на форштевне $g(1) = f_x(1, z)$. Именно эта величина больше других изменяется от сдвига волн, поэтому для того, чтобы ввести поправку на сдвиг, необходимо знать производную в той точке главной действующей ватерлинии, где находится точка отхода первой носовой волны от поверхности корпуса. В анализе, описанном в предыдущей статье, подбирался множитель к $g(1)$, т.е. в формуле (5) вместо

$$G_{bo} = g(1) - g''(1)k^{-2} + g^{IV}(1)k^{-4} \dots$$

берётся

$$G_{bo} = g(1) * \delta\alpha - g''(1)k^{-2} + g^{IV}(1)k^{-4} \dots,$$

где

$$\delta\alpha = a + b \cdot (Fr - Fr_o). \quad (3)$$

Для проверки такого подхода, выполнены расчёты остаточного сопротивления для 17 разных моделей В.Виглея и Г.Вейнблума. Изменение угла входа $\delta\alpha$ пришлось подбирать для каждой модели отдельно. Величины a и b имеют разный смысл и поэтому ведут себя по-разному. Величина a учитывает величину сдвига носовой системы волн в корму и соответствующее этому сдвигу изменение угла наклона касательной к поверхности корпуса судна. Коэффициент b определяет изменение сдвига по мере увеличения скорости движения судна. Поведение коэффициентов a и b показано на рис. 3 и 4. Графики построены по тем моделям, по которым выполнялось исследование. Коэффициент a с увеличением угла входа ватерлиний уменьшается, а коэффициент b наоборот. Но принять эти коэффициенты по линейному тренду (штриховая линия на рис.3 и 4) невозможно. При выборе этих коэффициентов выяснилось, что они изменяются в очень узких пределах. Малейшее изменение любого из этих коэффициентов может привести к значительному ухудшению результата расчёта

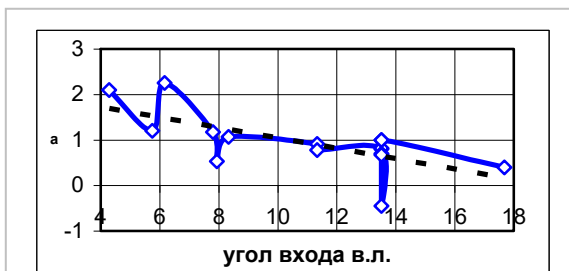


Рис. 3. Зависимость коэффициента a от угла входа действующей ватерлинии

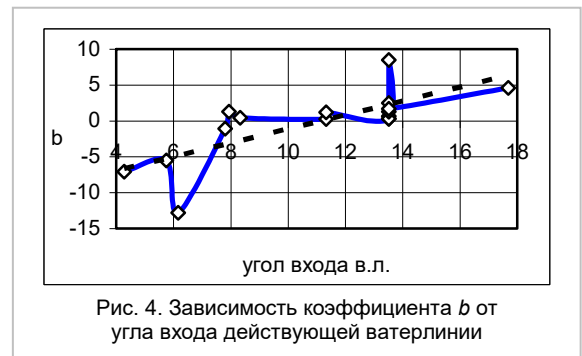


Рис. 4. Зависимость коэффициента b от угла входа действующей ватерлинии

В ПРИЛОЖЕНИИ 1 приведены примеры расчётов для 17 моделей с разными углами входа α и разными значениями призматического коэффициента ϕ . Как видно из примеров, в большинстве случаев за редким исключением получено хорошее согласование расчётной кривой с экспериментальной кривой остаточного сопротивления. Это подтверждает правильность понимания влияния вязкости на волнообразование судна. Следует заметить, что никакие другие поправки, а их в процессе поисков решения данной задачи было перепробовано немало, не давали такого результата. Кроме того, взятая за основу физическая картина достаточно убедительна.

Для разработки практического метода расчёта остаточного сопротивления реальных судов необходимы систематические эксперименты для получения кривой зависимости длины сдвига волнообразующей точки носовой волновой системы, главных размеров, коэффициента продольной полноты и др. в зависимости от угла входа ватерлиний в носу. В первую очередь в СГУВТ запланирован эксперимент для определения зависимости длины сдвига волнообразующей точки от угла входа носовых ватерлиний. Для этого проектируется серия моделей с одинаковыми главными размерениями, но с углами входа действующей ватерлинии, меняющимися от 8° до 18° .

Заключение

В статье рассмотрен способ расчёта остаточного сопротивления как результата взаимодействия вихревого и волнового сопротивления. Приведены доказательства того, что пограничный слой и попутный поток не влияют на волновое сопротивление. Вязкость влияет на корабельные волны, во-первых, образуя турбулизированный пограничный слой под волновой поверхностью, во-вторых, сдвигая носовую систему кельвиновских волн в корму. Именно учёт этих воздействий позволяет рассчитать остаточное сопротивление.

Для расчёта остаточного сопротивления использован интеграл Мичелла, в который вводятся две поправки, учитывающие действие вязкости. Первая поправка вводится в виде экспоненциального множителя, а вторая - входит в виде множителя к углу входа ватерлиний.

Расчёт выполнен для 17 аналитических моделей В.Виглея и Г.Вейнблума, данные по

которым приведены в предыдущей статье. В ПРИЛОЖЕНИИ 1 приводятся сравнения расчётных кривых с экспериментальными кривыми остаточного сопротивления. Показаны результаты введения экспоненциальной поправки, учитывающей подповерхностный пограничный слой, что уменьшает высоту носовой системы волн и таким образом сглаживает горбы и впадины на расчётной кривой Мичелла. Кроме того, приведены расчётные кривые, полученные с обеими поправками, для всех 17 моделей, для которых выполнялись расчёты. Получено хорошее согласование расчетов с экспериментальными данными. Сравнительные расчёты подтвердили

правильность данного подхода к определению остаточного сопротивления, показав хорошее совпадение расчётных и экспериментальных кривых остаточного сопротивления.

В ПРИЛОЖЕНИИ 2 приведены характеристики моделей – угол входа ватерлиний и призматический коэффициент, а также значения поправок, при которых получены результаты, приведенные в приложении 1

Литература

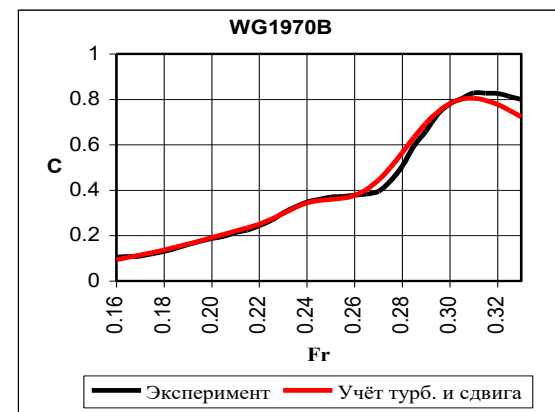
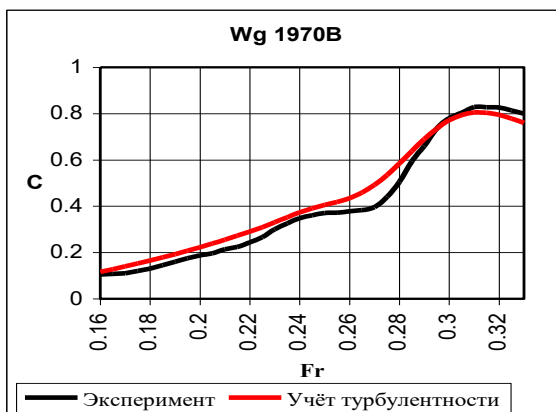
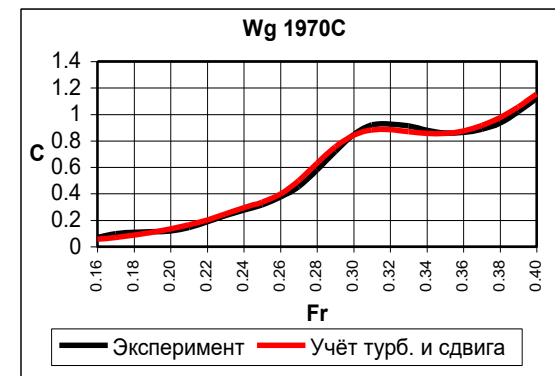
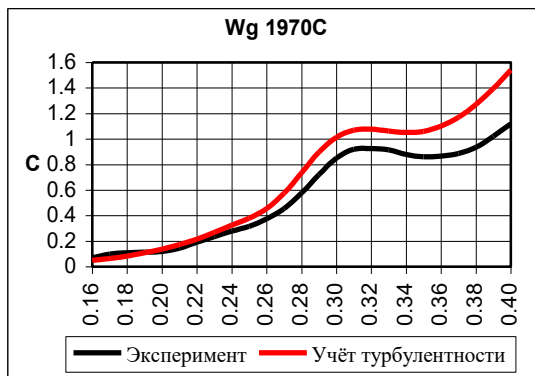
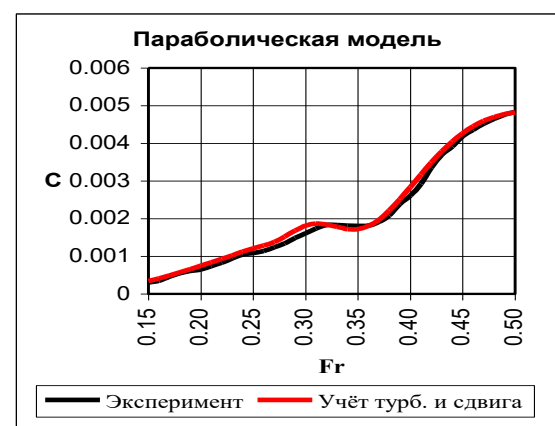
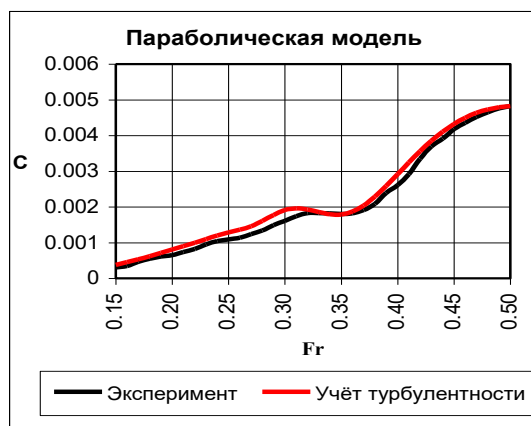
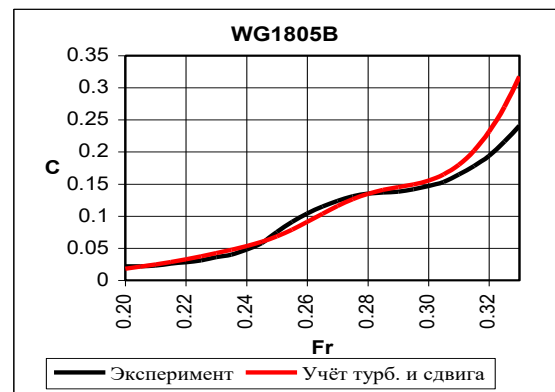
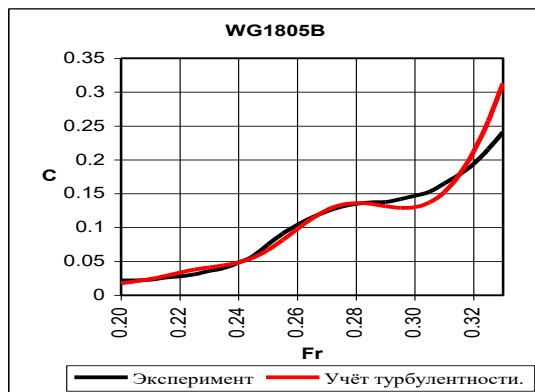
1. Baba, E. Study on separation of ship resistance components. *Journal of Society Nav. Arch. Japan*, 1969, **125**, 9 – 22.
2. Inui, T. From Bulbous Bow to Free-Surface Shock Wave – Trends of 20 Years' Research on Ship Waves at the Tokyo University Tank. *Journal of Ship Research*, 1981, **5**, 3, 147-180.
3. Miyata, H. & Inui, T. Nonlinear ship waves. *Advances in Applied Mechanics*, 1984, **24**, 215-288.
4. Sharma, S.D. Some results concerning the wavemaking of a thin ship. *Journal of Ship Research*, 1969, **13**, 1, 72-81.
5. Weinblum, G.P., Kendrick J.J. & Todd M.A. Investigation of wave effects produced by a thin body – TMB Model 4125. *Navy Department, the David W. Taylor Model Basin*, 1952, Washington 7.DC, Report 840.
6. Gotman, A.Sh. Study of Michell's Integral and influence of viscosity and ship hull form on wave resistance. *Oceanic Engineering International*, 2002, **8**, 2, 74 – 115.
7. Готман А.Ш. К вопросу интерференции носовой и кормовой систем корабельных волн // Материалы по обмену опытом. ВНТО им. ак. А.Н.Крылова, Судостроение, 1989, 469, 36 – 49.
8. Готман А.Ш. Изучение вихревого сопротивления водоизмещающих судов // МИТ 4(22), 2013, 11-19, Санкт-Петербург, Россия.

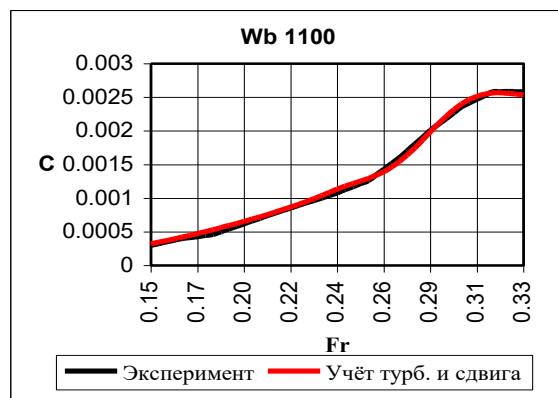
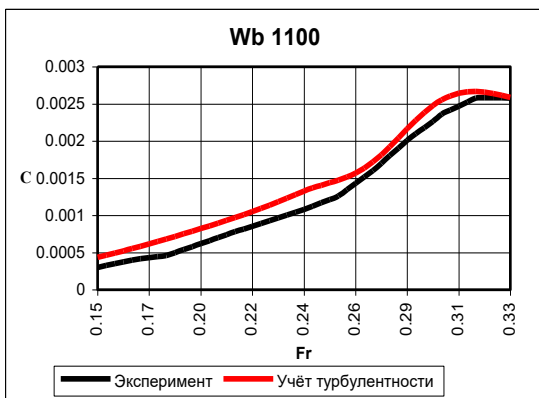
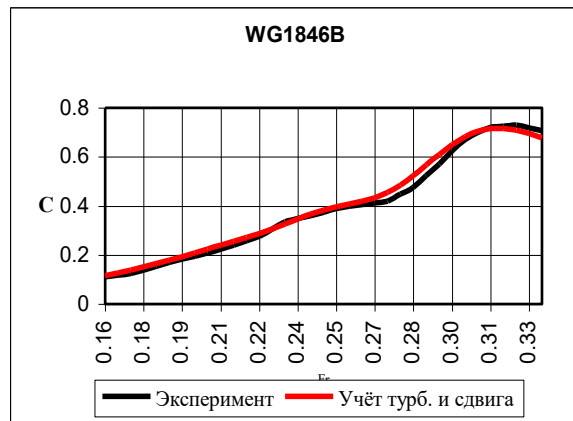
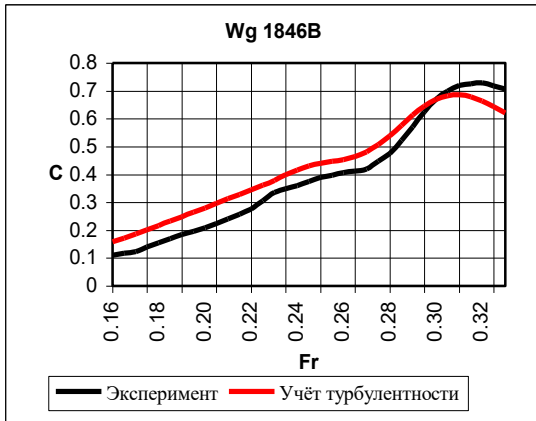
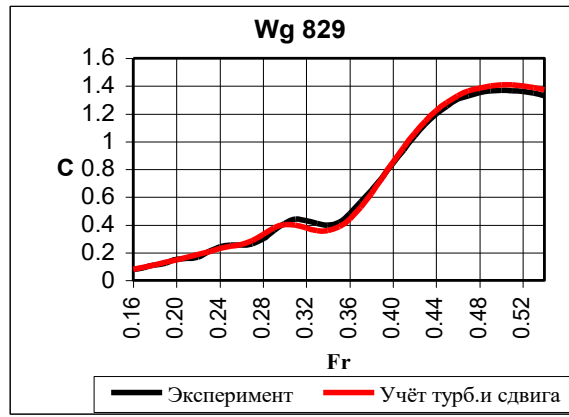
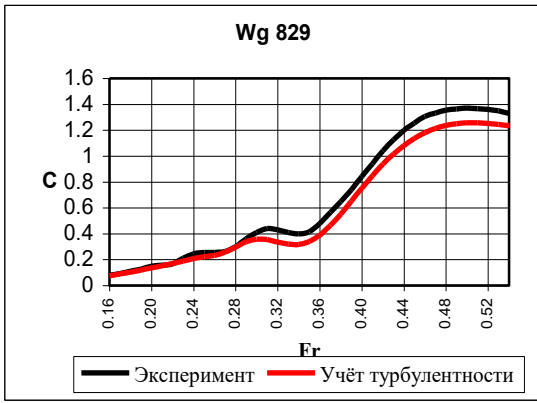
References

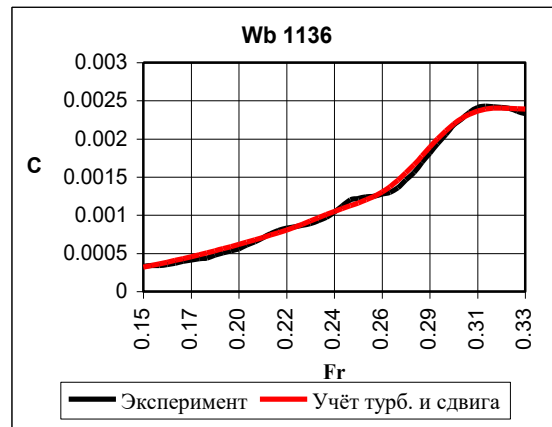
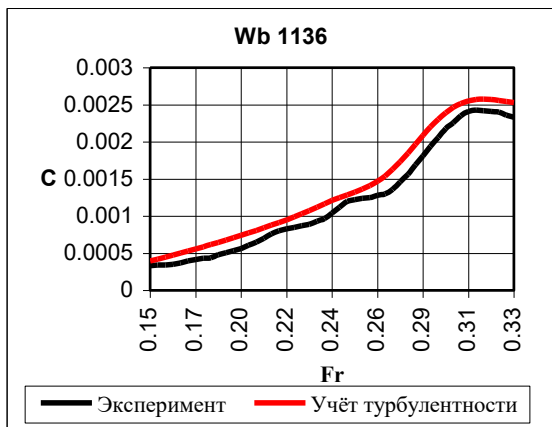
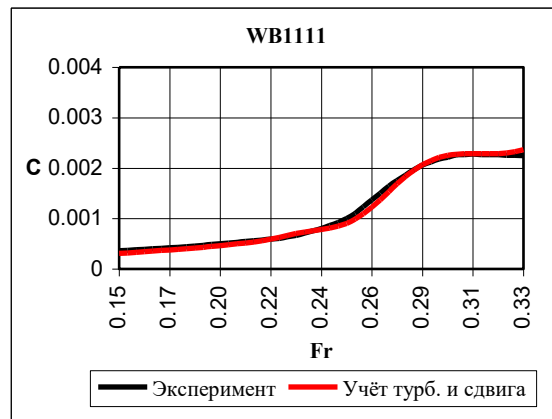
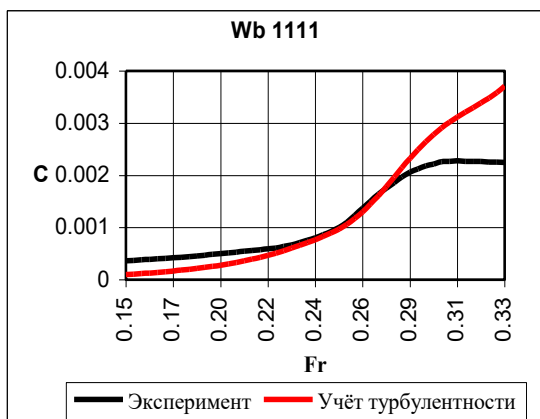
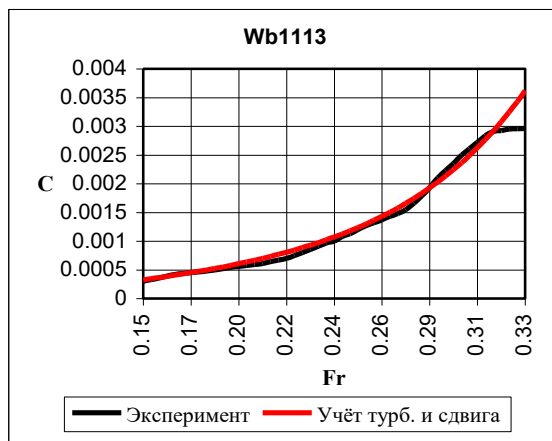
1. Baba, E. Study on separation of ship resistance components. *Journal of Society Nav. Arch. Japan*, 1969, **125**, 9 – 22.
2. Inui, T. From Bulbous Bow to Free-Surface Shock Wave – Trends of 20 Years' Research on Ship Waves at the Tokyo University Tank. *Journal of Ship Research*, 1981, **5**, 3, 147-180.
3. Miyata, H. & Inui, T. Nonlinear ship waves. *Advances in Applied Mechanics*, 1984, **24**, 215-288.
4. Sharma, S.D. Some results concerning the wavemaking of a thin ship. *Journal of Ship Research*, 1969, **13**, 1, 72-81.
5. Weinblum, G.P., Kendrick J.J. & Todd M.A. Investigation of wave effects produced by a thin body – TMB Model 4125. *Navy Department, the David W. Taylor Model Basin*, 1952, Washington 7.DC, Report 840.
6. Gotman, A.Sh. Study of Michell's Integral and influence of viscosity and ship hull form on wave resistance. *Oceanic Engineering International*, 2002, **8**, 2, 74 – 115.
7. Gotman A.Sh. K voprosu irterferenciji nosovojij l kormovojij system korabelnikh voln. *Materiali po obmenu opitom*. VNTO im. ak. A.N.Krilova. Sudostroenie 1989, 469, 36-48
8. Gotman A.Sh. Isuchenie vikhrevogo soprotivlenija vodoizmeshchajushchikh sudov. MIT 4(22), 2013, 11-19, St.Petersburg, Russia.

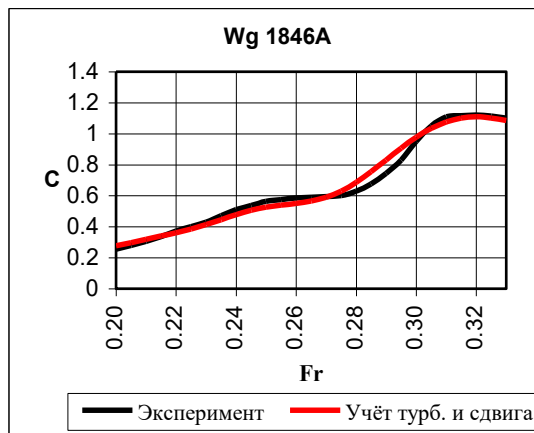
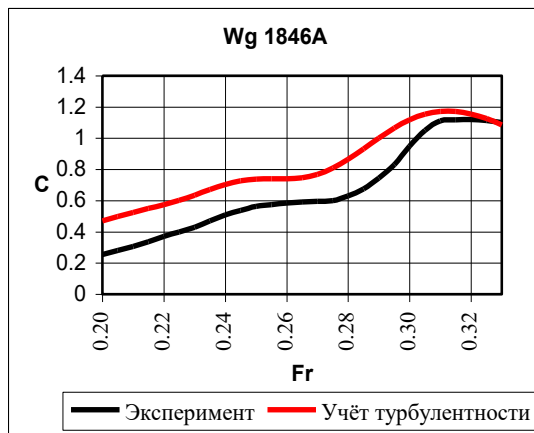
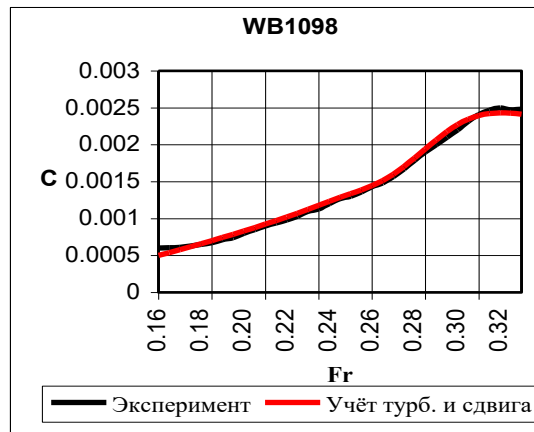
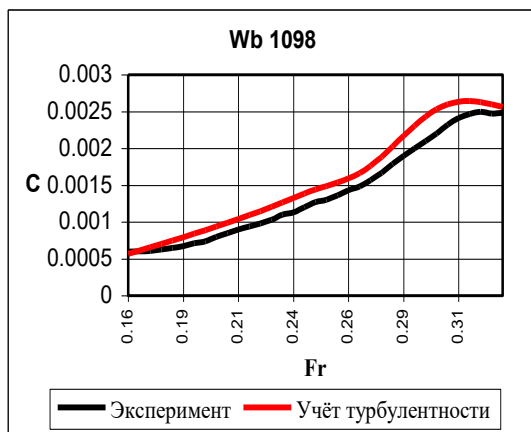
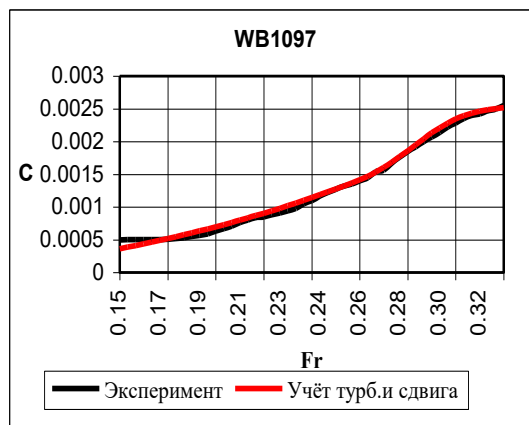
ПОЛОЖЕНИЕ 1

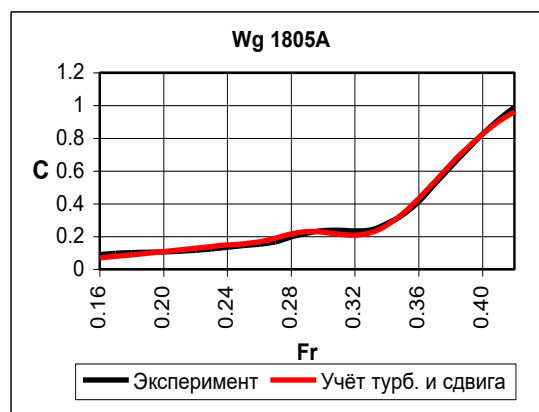
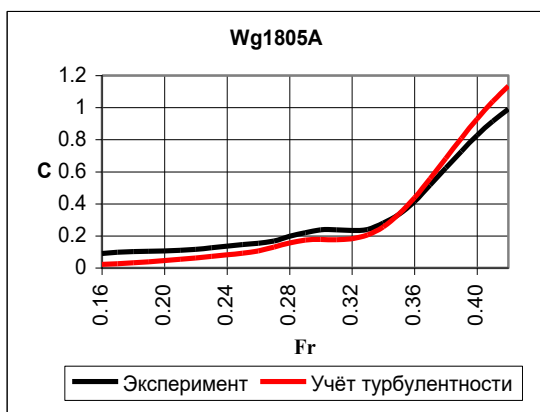
В приложении даётся сравнение кривых сопротивления, полученных расчётным путём: в интеграл Мичелла вводятся две описанные в тексте поправки.











ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

Приводятся значения первой и второй поправок для расчётов остаточного сопротивления с помощью интеграла Мичелла

Основные параметры формы обводов и значения поправок, учитывающие взаимодействие вихревого и волнового сопротивления					
№п/п	Модель	Угол входа α и призматический коэффициент φ	$\delta\alpha = a + b(Fr - Fr_0)$		V_{turb}
			a	b	
1	Wg_1805B	$\alpha = 0^{\circ}00'$, $\varphi = 0,533$	-0,03	-0,01	0,08
2	Wg_1805A	$\alpha = 4^{\circ}17'$, $\varphi = 0,533$	2,30	-6,70	0,08
3	Wg_1970C	$\alpha = 5^{\circ}45'$, $\varphi = 0,700$	1,2	-5,5	0,08
4	Wb_1111	$\alpha = 6^{\circ}10'$, $\varphi = 0,647$	2,32	-12,9	0,08
5	Wb_1114	$\alpha = 7^{\circ}48'$, $\varphi = 0,657$	1,00	-0,001	0,08
6	Wb_1098	$\alpha = 7^{\circ}56'$, $\varphi = 0,693$	0,53	1,3	0,08
7	Wg_829	$\alpha = 8^{\circ}20'$, $\varphi = 0,640$	1,07	0,45	0,08
8	Parabolic	$\alpha = 11^{\circ}20'$, $\varphi = 0,667$	0,91	0,25	0,08
9	Wg_1970B	$\alpha = 11^{\circ}20'$, $\varphi = 0,700$	0,78	1,20	0,05
10	Wb_1097	$\alpha = 13^{\circ}31'$, $\varphi = 0,693$	0,80	0,30	0,08
11	Wg_N43	$\alpha = 13^{\circ}31'$, $\varphi = 0,879$	-0,45	8,5	0,08
12	Wb_1136	$\alpha = 13^{\circ}31'$, $\varphi = 0,690$	0,82	0,65	0,08
13	Wb_1110	$\alpha = 13^{\circ}31'$, $\varphi = 0,656$	1,00	0,3	0,08
14	Wb_1100	$\alpha = 13^{\circ}31'$, $\varphi = 0,690$	0,7	1,3	0,08
15	Wg_1846B	$\alpha = 13^{\circ}31'$, $\varphi = 0,693$	0,67	2,5	0,08
16	Wb_1113	$\alpha = 13^{\circ}31'$, $\varphi = 0,666$	1,00	1,7	0,08
17	Wg_1846A	$\alpha = 17^{\circ}41'$, $\varphi = 0,587$	0,4	4,6	0,008