

ИЗУЧЕНИЕ ВИХРЕВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДОИЗМЕЩАЮЩИХ СУДОВ

Член-корреспондент РАЕ и РИА, д.т.н., проф. Ада Шоломовна Готман

ФБОУ ВПО

«НОВОСИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА»

630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33

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

В работе рассмотрено вихревое сопротивление водоизмещающих судов. Показано, что удар, который происходит в носу судна, является источником вихревого сопротивления. Выявлен механизм взаимодействия вихревого и волнового полей вокруг движущегося судна. Выбраны два направления дальнейших исследований для разработки метода расчёта остаточного сопротивления водоизмещающих судов.

1. Введение

Конечная цель исследований, которым посвящена данная статья, состоит в изыскании метода оценки остаточного сопротивления водоизмещающего судна в процессе проектировании его обводов. Остаточное сопротивление представляет собой сумму вихревого и волнового сопротивления. Проблеме волнового сопротивления посвящены сотни теоретических и экспериментальных исследований, но вихревая составляющая сопротивления судна требует дальнейшего изучения.

В. Фруд разделил полное сопротивление воды движению судна на сопротивление трения и остаточное. Он придумал способ экспериментального и

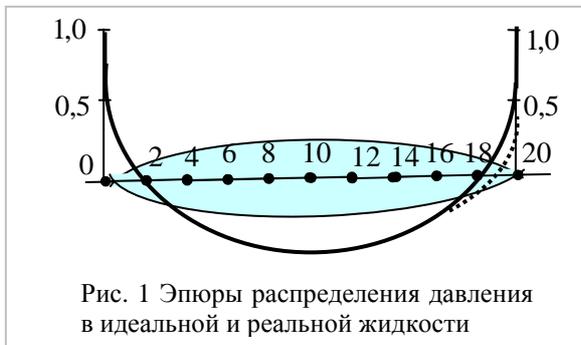


Рис. 1 Эпюры распределения давления в идеальной и реальной жидкостях

даже расчётного способа определения сопротивления трения. Это дало возможность отделить те составляющие сопротивления судна, которые моделируются по числу Рейнольдса, от тех, которые моделируются по числу Фруда. Это дало способ пересчёта результатов модельных испытаний на натурное судно. В настоящее время, благодаря решению Мичелла [1], дающего сопротивление, связанное с носовой и кормовой кельвиновскими системами волн, можно рассчитать волновое сопротивление для судна с заданными обводами [2, 3, 4].

Сопротивление трения достаточно точно рассчитывается по известным экстраполяторам трения. Сумму волнового сопротивления и сопротивления трения можно вычесть из полного сопротивления и получить вихревое сопротивление в процессе традиционных буксировочных испытаний в опытовом бассейне. Это вихревое сопротивление связано с подпорными, ударными волнами, ожерельем вихрей и попутным потоком.

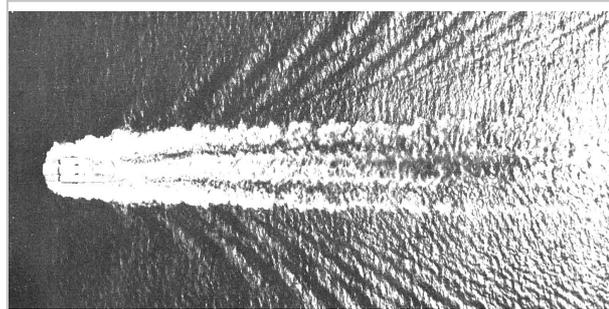
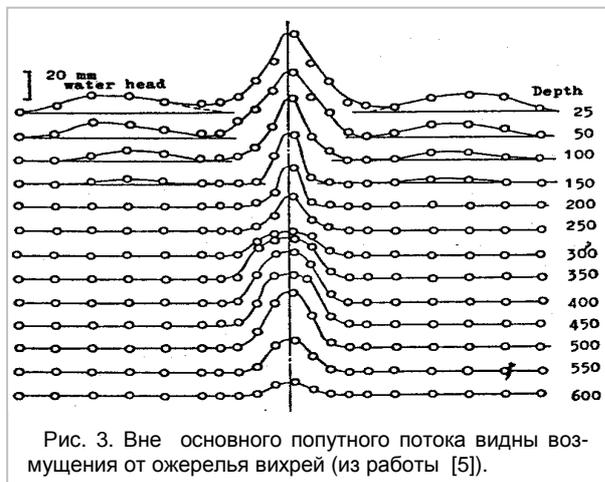


Рис. 2 Ожерелье вихрей, вихревой попутный поток и типичная волновая система

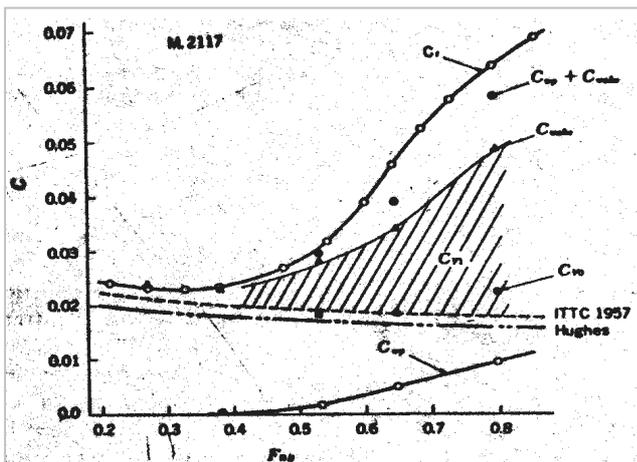
Принято учитывать вихревое сопротивление (сопротивление формы) в виде разности распределения давлений в корме. Эта разность возникает за счёт изменения распределения давления в кормовой части дублированной модели при приближении к свободной поверхности (рис. 1). У обычных водоизмещающих судов это изменение эпюры оценивается в виде небольшой поправки. Но достаточно посмотреть на рис. 2, чтобы понять, что вихревое сопротивление связано с вихревыми потоками, идущими от носа, и может составлять достаточно большую величину.

Впервые на идущие от носа вихри обратил внимание Е.Баба [5, 6]. Он обнаружил, что в корме в плоскости, перпендикулярной к ДП корпуса, вне ширины попутного потока наблюдаются значительные потери количества движения (рис. 3). Вихревой поток, идущий вне корпуса и попутного потока он назвал «разрушающимися волнами». Впоследствии Танада назвал их «ожерельем вихрей». Е.Баба измерил потери количества движения за счёт разрушающихся волн на модели танкера. Оказалось, что

эти потери достигают значительной доли полного сопротивления. Позже в работе [7] Е.Баба выполнил анализ потока вокруг плоского судна (с отношением $B/T \approx 6$) и обнаружил, что вихревая компонента составляет ещё большую величину. Была испытана серия моделей длиной 7м, шириной 1м и с осадкой 0.1667м., отличающихся



коэффициентами полноты. На рисунке 4 представлены доли полного сопротивления: сопротивления трения, волнового сопротивления и вихревого (заштрихованная доля на числах Фруда от 0,1 до 0,7). Из эпюры видно как у плоского судна на числах Фруда больше 0,4 резко увеличивается доля вихревого сопротивления. Следует отметить, что одновременно в опытовом бассейне Гамбурга и в бассейнах Японии проводилось много исследований потока в носу водоизмещающих судов. Как правило, наряду с обычными обводами, в подобных работах рассматривается роль носового бульба. Список основных работ в этой области приводится в работах Т.Инуи [8] и Х.Мията и Т.Инуи [9].

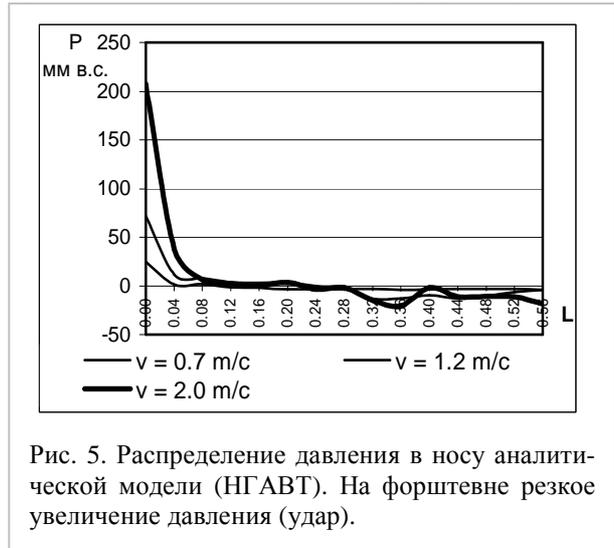


Несмотря на обилие экспериментальных работ, посвящённых изучению потока в окрестности носа движущегося судна, практического способа расчёта вихревой составляющей сопротивления в зависимости от заданной формы корпуса пока нет. Этим мало занимаются, по-видимому, потому, что в настоящее

время среди множества компьютерных программ, разработанных для расчётов ходкости есть, например, такие, как комплекс программ, составленных Холтропом FREE!ship Plus, который является инструментом, позволяющим получить обводы корпуса, рассчитать гидростатику и остойчивость, проработать максимальное количество вариантов проектируемого судна по ходкости. Холтроп использовал множество данных серийных испытаний по ходкости существующих судов, систематизировал их и, таким образом, получил великолепную программу, позволяющую при заданных условиях выбрать обводы по прототипу. Тем не менее, проектировщику необходимо ясное понимание работы и взаимодействия всех сил на корпусе движущегося судна, а для расчёта каждой составляющей полного сопротивления полезны любые имеющиеся исследования поля потока вокруг движущегося судна.

2. Определение источника вихревого сопротивления

Определить источник вихревого сопротивления невозможно, изучая картину потоков вне корпуса, потому что источником сопротивления является само движущееся судно. Например, Прандтль посчитал сопротивление трения, выдвинув гипотезу прилипания частиц жидкости к корпусу движущегося



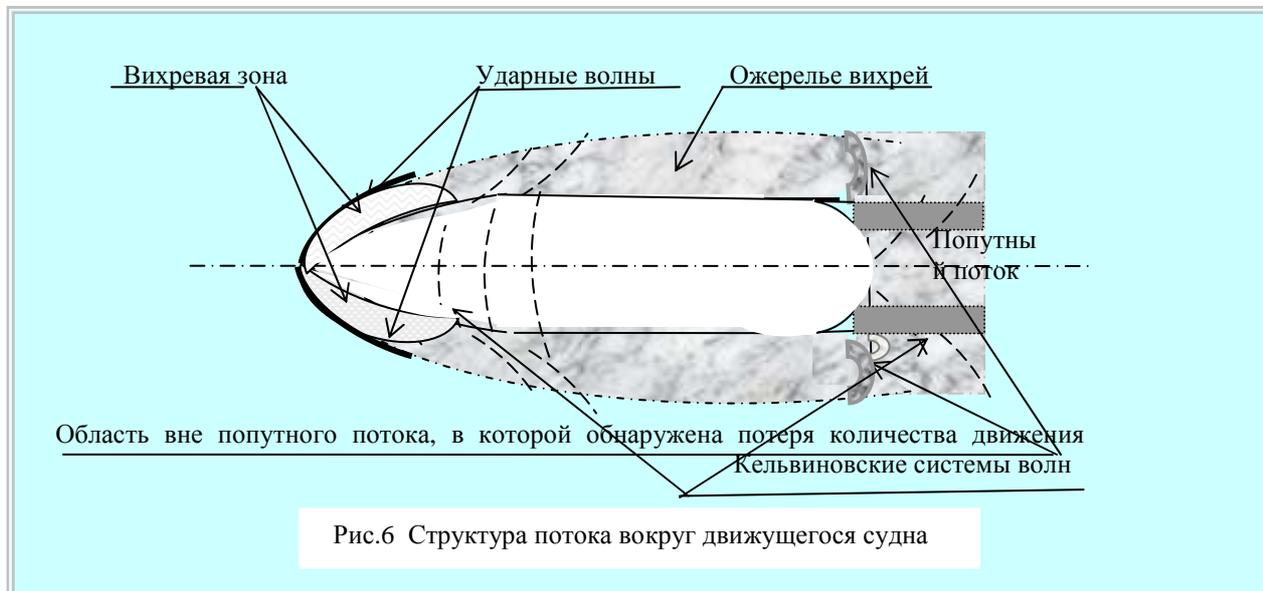
судна, что дало возможность посчитать касательные напряжения. На основании этой теории были получены экстраполяторы трения, по которым рассчитывают сопротивление трения с достаточной для практики точностью. Мичелл сумел найти способ расчёта волнового сопротивления, получив распределение давлений по корпусу судна. Учитывая, что вихревое сопротивление зависит от вязкости и выражается не в виде касательных напряжений, а в виде давлений, его источник нужно искать на корпусе там, где возникают вихревые явления. Кроме того, очень сложно определить какая часть давлений на корпусе возникает от вихрей и какая - от волнообразования, поэтому надо искать силы, которые определяют эти давления. Так как ударные волны и ожерелье вихрей возникают на форштевне, логично искать источник вихреобразования в носу корпуса судна. Сила волнового сопротивления, как уже указывалось выше, определяется из интеграла Мичелла. Сила вихревого сопротивления определяется

ударом (импульсным давлением) в носу [11]. Этот удар виден на рис. 5. Резкое увеличение давления (Красновы назвали его «импульсным давлением») на форштевне подтверждает существование удара в носу.

История возникновения гипотезы об ударе в носу возникла следующим образом. При анализе экспериментов с длинными моделями Вейнблума,

создавало большой удар. Отсюда ясен вывод о том, что именно энергия этого удара создаёт вязкие напряжения, влияющие на кельвиновские волны и вызывающие наблюдаемое нами вихреобразование.

Для проверки гипотезы удара был сделан натурный эксперимент на судне «Искатель», а затем замеры давлений в окрестности носа длинных аналитических моделей в опытовом бассейне НГАВТ



Кендрика и Тодда [13] и Шарма [14], описанных в работе [1], возник следующий вопрос: «Почему на шестиметровых моделях, у которых хорошо развитый пограничный слой, жидкость ведёт себя как идеальная?». Дело в том, что в этих опытах экспериментальные точки остаточного сопротивления совпали с кривой Мичелла со всеми горбами и впадинами. Решение Мичелла получено при трёх допущениях, одним из которых было предположение о том, что жидкость идеальная. Совпадение расчёта и эксперимента возможно только в том случае, если пограничный слой не влияет на кельвиновские системы волн.

Такой же вывод вытекает из экспериментов Е.Баба [6, 7]. Когда Е.Баба увеличивал шероховатость поверхности модели, чтобы увеличить ширину пограничного слоя, то это почти никак не влияло на волновое сопротивление. Такой же вывод был сделан на основании эксперимента с буксируемыми стойками, которые имитировали волны, создаваемые в носу и в корме судна и между которыми не было пограничного слоя судна [10]. Несмотря на отсутствие корпуса судна, кривая сопротивления тандема стоек имела такой же характер, какой имеют кривые остаточного сопротивления моделей водоизмещающих судов. Тогда же возник вопрос: «Почему у моделей с развитым пограничным слоем жидкость ведёт себя как идеальная, а у двух стоек авиационного профиля, где нет пограничного слоя, оказалось явное влияние вязкости?». Чтобы ответить на этот вопрос была выдвинута гипотеза о том, что основную роль во влиянии вязкости жидкости на сопротивление движущегося судна играет не сход потока в корме, а удар в носу. Модели Вейнблума и др. и Шарма имели очень малый угол входа, и удар в носу был мал, а у стоек угол входа большой, что

[11]. Следует отметить, что характер полученного графика на рис. 5 совпадает с характером кривой вихревого сопротивления, теоретически полученной И.Г.Хановичем [15, рис. 50]. Изучая поток в окрестности носа судна, Мията [8, 9] обнаружил существование около его носа ударных волн, что тоже подтверждает существование удара.

Таким образом, источниками вихревого сопротивления являются, во-первых, известное изменение эпюры давлений в корме за счёт влияния пограничного слоя или его отрыва [14] и, во-вторых, удар (импульсное давление) в носу судна.

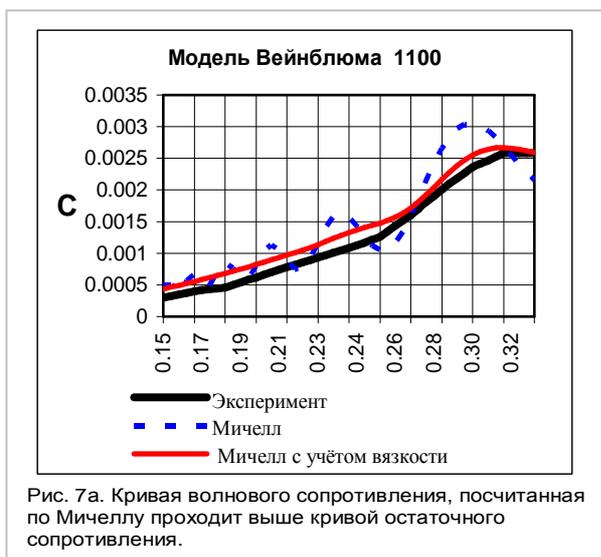
Первое составляет незначительную долю, поэтому в расчётах обычно учитывается небольшой поправкой. Удар в носу приводит к интенсивному вихреобразованию, которым в расчёте сопротивления воды движению судна (особенно, быстроходного) невозможно пренебречь. Справедливости ради следует сказать, что величина вихревого сопротивления в диапазоне чисел Фруда обычных водоизмещающих судов, по всей видимости, невелика и начинает резко возрастать при числах Фруда больше 0.3, но её влияние на картину потока может быть значительным даже на меньших числах Фруда.

С учётом всех описанных выше особенностей поток вокруг движущегося судна можно представить в виде схемы, показанной на рис. 6.

Так как остаточное сопротивление, определяемое обычно в опытовых бассейнах, представляет собой суммарную величину вихревого и волнового сопротивления, то кроме их величины необходимо рассматривать их взаимодействие.

3. Влияние вязкости жидкости на волновое сопротивление

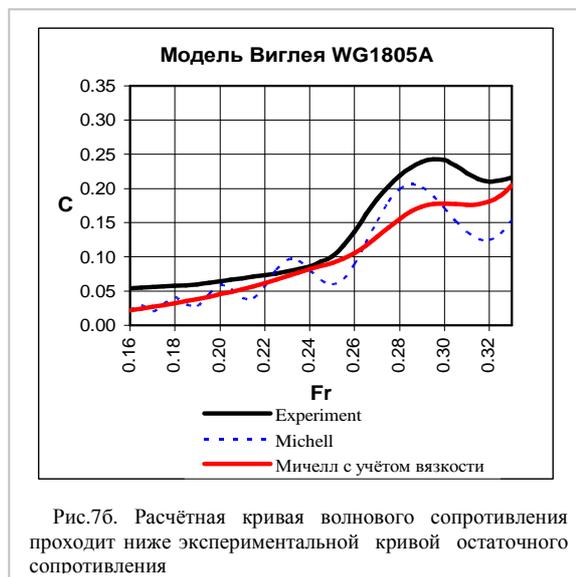
Интеграл Мичелла по самой постановке задачи не учитывает влияние вязкости жидкости. Ещё Виг-



лей заметил, что вязкость влияет только на взаимодействие систем корабельных волн, и происходит

не позволяет достичь размеров горбов и впадин, рассчитанных в идеальной жидкости. Это хорошо видно на рис. 7а и 7б.

На роль сдвигового слоя под свободной поверхностью указано во многих работах. Например, в ра-



№ п/п	Модели Виглея и Вейнблума	Угол входа α в рад.	β	δ	φ	$Fr = 0,2$
1	1846а	0.3083	0,666	0,498	0,747	$Rw > Rres$
2	1113	0.2361	0,839	0,5787	0,689	$Rw > Rres$
3	1846 б	0.2356	0,666	0,462	0,693	$Rw > Rres$
4	N43	0.2356	0,909	0,799	0,879	$Rw > Rres$
5	1100	0.2356	0,839	0,579	0,690	$Rw > Rres$
6	1110	0.2356	0,839	0,5506	0,656	$Rw < Rres$
7	1097	0.2356	0,75	0,5425	0,723	$Rw > Rres$
8	1136	0.2356	0,929	0,619	0,666	$Rw > Rres$
9	Parabolic	0.1978	0,556	0,444	0,667	$Rw > Rres$
10	1970b	0.1978	0,667	0,467	0,700	$Rw > Rres$
11	829	0.158	0,667	0,427	0,640	$Rw < Rres$
12	1098	0.1375	0,75	0,5196	0,692	$Rw > Rres$
13	1114	0.1361	0,839	0,55	0,656	$Rw < Rres$
14	1111	0.1075	0,839	0,542	0,647	$Rw < Rres$
15	1970 c	0.1003	0,671	0,467	0,700	$Rw > Rres$
16	1805 a	0.0748	0,666	0,391	0,587	$Rw < Rres$
17	1805 b	0.000	0,666	0,355	0,533	$Rw < Rres$

это по экспоненциальному закону [16]. Проверка этого влияния описана нами в работе [1]. Это влияние объясняется тем, что искривление свободной поверхности при волновом движении приводит к образованию под ней градиента скорости (вроде пограничного слоя), который гасит энергию волн и

боте [17] изучается влияние сдвигового потока под свободной поверхностью на зависимость ожерелья вихрей от параметров формы носа (осадки, угла входа и выдвинутого бульба). Для учёта этого влияния в своё время был получен экспоненциальный множитель [1], который приводит кривую Мичелла к

виду, достаточно близко совпадающему с кривой остаточного сопротивления (рис. 7а и 7б). Интересно и важно, что расчётная кривая волнового сопротивления может проходить как выше (рис. 7а), так и ниже экспериментальной кривой остаточного сопротивления (рис. 7б).

Так как остаточное сопротивление представляет собой сумму волнового и вихревого, то случаи, когда расчётная кривая волнового сопротивления проходит выше экспериментальной кривой остаточного сопротивления, являются парадоксальными и требуют специального исследования. Для анализа этого явления использованы результаты экспериментов с сериями аналитических моделей Виглея [18] и Вейнблума [19], выполненных в тридцатые годы двадцатого столетия.

Результаты сравнения относительного положения кривых Мичелла, полученных с учётом влияния вязкости под свободной волновой поверхностью, и экспериментального остаточного сопротивления сведены в таблицу 1. В этой таблице в правом столбце показано взаимное положение кривой Мичелла R_w и кривой остаточного сопротивления R_{res}



Рис. 8. Кадр из видео-фильма, снятого в опытовом бассейне НГАВТ аспирантами Красновым А.В. и Красновым А.В.

в диапазоне $0.15 < Fr < 0.3$. Из таблицы видно, что взаимное положение кривых Мичелла и остаточного сопротивления главным образом зависит от угла входа действующей ватерлинии. Это следует из положения моделей в таблице по порядку убывания углов входа (третий столбец). Из таблицы видно также, что кроме угла входа действующей ватерлинии на взаимное положение расчётной и экспериментальной кривой влияет коэффициент продольной полноты ϕ . Это показано выделением тех значений ϕ , которые объясняют нарушение порядка в крайнем правом столбце. Например, у модели Вейнблума 1110 угол входа такой же, как у соседних, однако расчётная кривая Мичелла проходит, в отличие от других, ниже кривой остаточного сопротивления. Это можно объяснить только тем, что у

неё коэффициент ϕ меньше соседних. То же происходит с моделью Виглея 829.

Конечно, эти выводы получены в первом приближении, и необходим более детальный анализ, но в первую очередь требуется разобраться в причинах парадоксального положения расчётной кривой Мичелла выше экспериментальной кривой остаточного сопротивления.

4. Механизм взаимодействия вихрей и корабельных волн

Следующий вопрос, без ответа на который невозможно разрешить обнаруженный парадокс, заключается в определении механизма взаимодействия потенциальных волн и завихрённостей в окрестности движущегося судна.

В процессе экспериментов с длинными аналитическими моделями в опытовом бассейне НГАВТ аспиранты Краснов А.В. и Краснов А.В. обратили внимание на то, что вихревая зона, образующаяся за ударными волнами, отодвигает вершину системы носовых кельвиновских волн в корму (рис. 8). Такая вихревая зона видна не только в экспериментах Красновых, но и на всех фотографиях (рис. 9) в работах Х.Мията и Т.Инуи [8, 9]. Из их работ известно, что за ударными волнами образуется зона турбулентности, но её влияние на корабельные волны не было замечено японскими исследователями.

Существование границы раздела между вихревой зоной и потенциальным полем отметил Л. Рохзя в своей работе о точке стагнации, а вернее, центра давления в носу движущегося цилиндра [20].

То обстоятельство, что вихревая зона отодвигает волны, легко объяснить известным из гидромеханики фактом: вихри и потенциальный поток не могут существовать в одном пространстве. Таким образом, раскрывается механизм влияния вихрей на корабельные волны и взаимное влияние вихревого

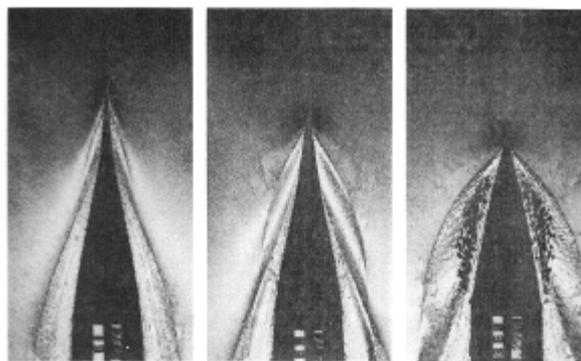


Рис. 9 (Из работы [9]) Носовые волны модели судна на $Fr=0.2774$ с углами входа $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$. Углы волнового гребня возрастают с возрастанием угла входа.

и волнового сопротивления. Это же даёт непротиворечивое объяснение парадокса с положением расчётной кривой волнового сопротивления выше кривой остаточного сопротивления. Механизм взаимодействия носовых вихрей и корабельных волн заключается в том, что вихревая зона, образующаяся за ударными волнами, сдвигает носовую систему кельвиновских волн в корму, уменьшая угол наклона

гребней носовой системы волн и её энергию. На фотографиях рисунков 8 и 9 эта вихревая зона видна в виде прилегающих к корпусу светлых продолговатых выпуклых фигур.

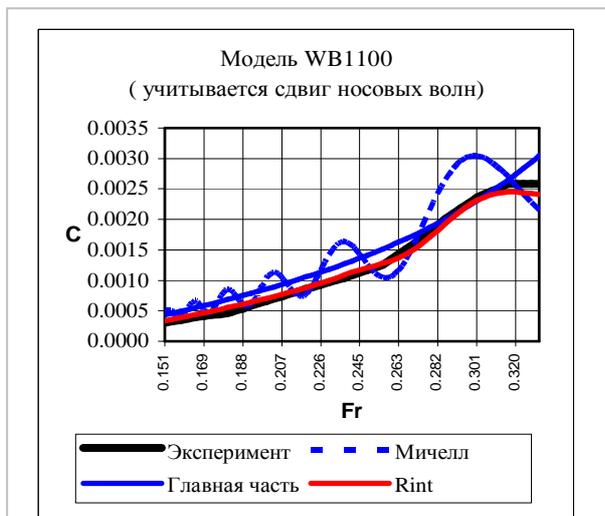


Рис. 10а. Расчётный коэффициент остаточного сопротивления: получен с учётом влияния вихревой зоны. Экспериментальный коэффициент взят из работы Вейнблума.

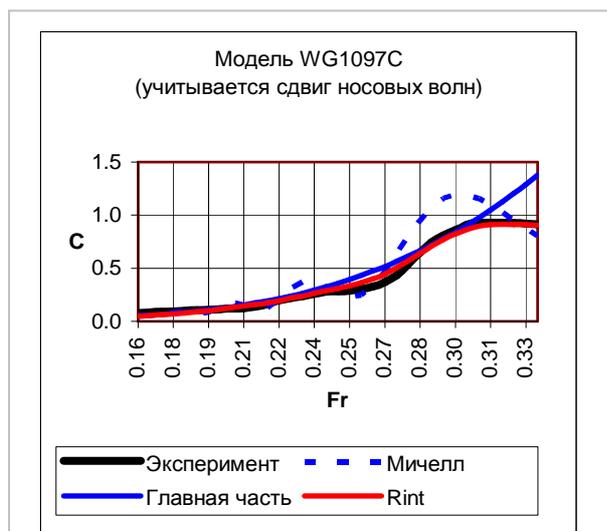


Рис. 11а. Расчётный коэффициент остаточного сопротивления: получен с учётом влияния вихревой зоны. Экспериментальный коэффициент взят из работы Виглея.

Этот факт имеет решающее значение для определения остаточного сопротивления. Дело в том, что в новой форме интеграла Мичелла [1] его величина зависит от производных поверхности корпуса на форштевне. В эксперименте и в природе, из-за сдвига вихревой зоной первую производную нужно брать на бортах корпуса, где угол, влияющий на величину расчётного волнового сопротивления, отличается от угла на форштевне. Когда форма действующей ватерлинии выпуклая, то волновая система сдвигается по корпусу туда, где касательная к поверхности составляет с ДП меньший угол, чем на форштевне, а если ватерлиния вогнутая, то этот угол становится больше. Учёт в расчёте этого угла

показал, что поправочный коэффициент зависит от числа Фруда и может убывать или возрастать в зависимости от кривизны поверхности. Для модели Вейнблума 1100 поправка к углу имеет вид $\delta k = 0,75 + 0,8(Fr - 0,15)$. Сравнение полученной расчётной кривой с экспериментальной показано на рис. 10а. У модели Виглея 1970С эта поправка равна $\delta k = 1,0 - 3,5(Fr - 0,16)$. Результаты расчёта показаны на рис. 11а. Формулу поправки можно записать так: $\delta k = a + m(Fr - Fr_0)$. Коэффициент a учитывает разницу между экспериментальной кривой остаточного сопротивления и кривой Мичелла в вязкой жидкости, а коэффициент m учитывает скорость изменения коэффициента δk по числу Фруда. Приличное совпадение расчётных кривых с экспериментальными подтвердило правильность выбранного метода учёта влияния вихревой зоны на потенциальный волновой поток. На графиках 10а и 11а показаны результаты расчёта коэффициента волнового сопротивления с учётом влияния подповерхностного сдвигового слоя жидкости и вихревой зоны.

5. Оценка вихревого и остаточного сопротивления

Для получения расчётной формулы силы импульсного давления R_{imp} (удара) за основу взята формула удара Ньютона. Ньютон [21] считал, что вся энергия удара в носу переходит в касательные напряжения ударного слоя, поэтому у него в формуле входит площадь ударного слоя. По такой формуле он определял полное сопротивление воды движению судна. Если исходить из того, что удар в носу создаёт дополнительные давления на корпусе, а не касательные напряжения, то вместо площади ударного слоя нужно взять площадь миделевого сечения S_{\otimes} (или самого полного шпангоута). Тогда расчётная формула получается в виде

$$R_{imp} = k \frac{\rho v^2}{2} \sin^2 \alpha S_{\otimes}, \quad (1)$$

где ρ - массовая плотность, v - скорость движения судна, α - угол входа действующей ватерлинии, k - эмпирический коэффициент. Для получения эмпирического коэффициента k был выполнен предварительный анализ. Для него использованы эксперименты серий аналитических моделей Вейнблума и Виглея [9,10]. Этот анализ показал, что величина коэффициента k зависит как от угла входа действующей ватерлинии α , так и от коэффициента продольной полноты φ . и он может быть записан в виде $k = k(\alpha, \varphi)$.

На графиках 10б и 11б даны результаты расчётов остаточного сопротивления как суммы вихревого и волнового сопротивления. При этом вихревое сопротивление принято равным силе импульсного давления, определённого по формуле (1) и взятого со знаком плюс или минус. Получилось, что при малых углах входа действующей ватерлинии остаточное сопротивление равно сумме волнового и вихревого сопротивления, а при больших углах входа – разности. Выяснить это можно только, более детально разобравшись в зависимости коэффициента

$k = k(\alpha, \varphi)$ не только от угла входа ватерлинии α и коэффициента продольной полноты φ , но, по всей видимости, ещё от кривизны поверхности носовой оконечности. Коэффициент $k = k(\alpha, \varphi)$ по смыслу представляет собой синуса угла θ - наклона касательной к корпусу в точке приложения равнодействующей давлений на корпусе, образующихся от удара.

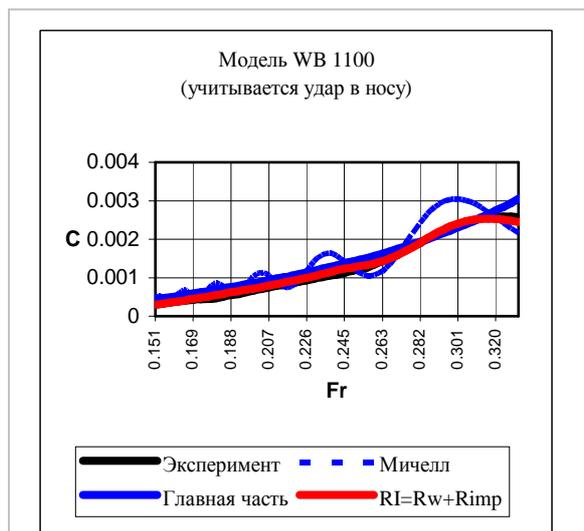


Рис. 10б. Расчётный коэффициенты остаточного сопротивления взят в виде суммы волнового сопротивления

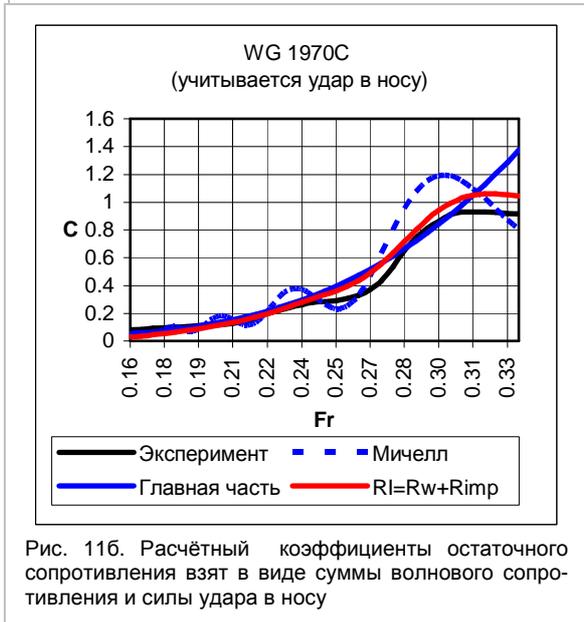


Рис. 11б. Расчётный коэффициенты остаточного сопротивления взят в виде суммы волнового сопротивления и силы удара в носу

Итак, в работе проверены два подхода к определению остаточного сопротивления. Один подход заключается в расчёте волнового сопротивления с учётом влияния пограничного слоя под свободной волновой поверхностью и сдвига вершины носовых волн вихревой зоной (рис. 10а, 11а). Во втором подходе остаточное сопротивление определяется в виде суммы волнового сопротивления R_w и вихревого сопротивления, равного удару на форштевне R_{imp} (рис.10б, 11б).

Расчёты выполнены для серии моделей Вейнблума и Виглея, но в качестве примера приведены расчётные и экспериментальные кривые только для модели Вейнблума 1100, у которой кривая волнового сопротивления проходит выше экспериментальной кривой остаточного сопротивления, и для модели Виглея 1970С, у которой кривая волнового сопротивления проходит ниже кривой остаточного сопротивления.

Хорошее согласование расчётов с экспериментальными данными показало, что направление поиска метода расчёта остаточного сопротивления выбрано правильно. Однако для выполнения таких расчётов для реальных судов и их моделей необходимо знать зависимость длины вихревой зоны от скорости, чтобы найти изменение угла входа действующей ватерлинии, а также уметь определять величину силы импульсного давления и точно знать условия, при которых эту силу нужно вычитать или прибавлять к силе волнового сопротивления.

Заключение

В работе описаны эксперименты, подтверждающие существование удара (импульсного давления) в носу движущегося судна. Этот удар рассматривается как основной источник образования ударных волн и ожерелья вихрей вокруг движущегося судна, составляющих вихревое сопротивление. Предложена формула для определения силы этого удара.

Рассмотрено вихревое сопротивление водоизмещающих судов в диапазоне чисел Фруда $0,15 < Fr < 0,3$. На основании анализа десятков экспериментов Виглея и Вейнблума с аналитическими моделями выявлено парадоксальное взаимное положение расчётных кривых волнового сопротивления и экспериментальных кривых остаточного сопротивления. Парадокс состоит в том, что, являясь частью остаточного сопротивления, расчётные значения волнового сопротивления во многих случаях оказываются больше значений остаточного сопротивления. Показано, что такое взаимное положение кривых зависит от угла входа действующей ватерлинии и величины коэффициента продольной полноты.

Дальнейший анализ вихревого и волнового полей вокруг движущегося судна показал, что парадокс связан с взаимодействием этих полей. Так как вихревое и потенциальное поле не могут существовать в одном пространстве, то вихревая зона, образующаяся за ударными носовыми волнами, сдвигает волновую носовую систему кельвиновских волн в корму. Сдвиг вершины кельвиновской системы волн меняет интенсивность волнообразования и, как следствие, изменяется величина волнового сопротивления. Так как в расчёте волнового сопротивления жидкость предполагается идеальной, то взаимодействие с вихревой зоной в расчёте не может быть учтено.

Разработаны и проверены два метода расчёта суммарной величины вихревого и волнового сопротивления, которые показали хорошее согласование с экспериментальными данными. Для доработки этих методов необходимы специальные исследования. Во-первых, нужно получить зависимость длины

вихревой зоны от скорости и формы носовой оконечности, чтобы определять величину смещения вершины носовой системы корабельных волн. Вторых, необходимо найти зависимость коэффициента $k = k(\alpha, \varphi)$, входящего в формулу (1), от угла входа действующей ватерлинии и коэффициента продольной полноты.

Литература

1. *Gotman A.Sh.* Study of Michell's integral and influence of viscosity and ship hull form on wave resistance, *Oceanic Engineering International*, 2002, **6**, 2, 74 – 115 (in English).
2. *Готман А.Ш.* Метод расчёта волнового сопротивления и сопротивления трения по теоретическому чертежу. Морские интеллектуальные технологии. Специальный выпуск №2 2011г. с. 19 – 23.- Санкт - Петербург, Россия.
3. *Готман А.Ш.* Аналитическое описание судна с помощью корабельной верзиеры. Доклады научно-технической конференции «Проблемы мореходных качеств судов, корабельной гидромеханики и освоения шельфов», XVIII Крыловские чтения. СПб, 2009, с. 35 -37.
4. *Готман А.Ш.* Аналитическое задание поверхности корпуса корабля произвольной формы. *Морской вестник*, 2010, № 1 (33). 81 – 85.
5. *Baba, E.* A new component of viscous resistance of ships. *J. Soc. Nav. Arch., Japan*, 1969, **125**, p. 23-34.
6. *Baba, E.* Analysis of surface flow near the bow of flat ships. *Japan Shipbuilding and Marine Engineering*, 1975, **9** (2), 5-19.
7. *Baba, E.* Study on separation of ship resistance components. *Journal of Society Nav. Arch. Japan*, 1969, **125**, 9 – 22.
8. *Inui, T.* From Bulbous Bow to Free-Surface Shock Wave – Trends of 20 Years' Research on Ship Waves at the Tokyo University Tank. *J. Ship Res.* 1981, **25**, 3, 147-180.
9. *Miyata, H. & Inui, T.* Nonlinear ship waves. *Advances in Applied Mechanics*, 1984, **24**, 215-28.
10. *Готман А.Ш.* К вопросу интерференции носовой и кормовой систем корабельных волн. Материалы по обмену опытом ВНТО им. ак. А.Н.Крылова, 1989, вып. 469, Судостроение. 36 – 49.
11. *Готман А.Ш., Краснов А.В., Краснов А.В.* Изучение поведения воды в носовой оконечности движущегося судна. *Морские интеллектуальные технологии* 2 (12) 2011, с. 27-32.
12. *Готман А.Ш.* Проблемы определения вихревой составляющей сопротивления движению судна. Доклады научно-технической конференции XLV Крыловские чтения 2013, Санкт-Петербург.- 2013, с. 31-33.
13. *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.
14. *Sharma, S.D.* Some results concerning the wavemaking of a thin ship. *J. Ship Research*, 1969, **13**, с.72-81.
15. *Ханович И.Г.* Сопротивление воды движению корабля.- Военное издательство министерства вооруженных сил Союза ССР.- 1946, 316 с.
16. *Wigley, W.C.S.* Effects of viscosity on the wave-making of ship. *Trans. of the Inst. of Engin. Ship Builders in Scotland*, 1937-8, **81**, 187-212.
17. *Eggers, K.W.H. & Takekuma K.* Effect of bow shape on free surface shear flow. 15th ONR.- Symposium on Naval Hydrodynamics, Hamburg. Institut für Schiffbau der Universität, no 2342. *Ship Builders in Scotland*, **81**, 187-212.
18. *Wigley, W.C.S.* Ship wave resistance. A comparison of mathematical theory with experimental results. *Trans. INA*, 1930, **72**, 216-228.
19. *Weinblum, G.P.* Schiffsform und Wellenwiderstanden. *Jarbuch der Schiffbautech*, Jarbuch, Gessellschaft, 1932, **33**, 419-451.
20. *Raheja L.* On submerged Stagnation Points and Bow Vorticities Generation (Indian Institute of Technology, Kharagpur, India). Это неопубликованная работа была прислана автору доктором К. Эггерсом в 2004 году.
21. *Hayes W. D., Probst R. F.* Hypersonic flow theory. Academic press, New York, London, 1959..