

УДК 629.12.011

Вихревая составляющая сопротивления воды движению судна

А. Ш. Готман¹

Новосибирская государственная академия водного транспорта

Представлены результаты расчётных и экспериментальных исследований волновой и вихревой составляющих сопротивления воды движению судна. Исследование сосредоточено на вихревой составляющей сопротивления. Отмечено, что интеграл Мичелла даёт возможность оценить только кельвиновские системы волн, а ударные волны, разрушающиеся волны и вихреобразование попутного потока связаны с вязкими свойствами жидкости и поэтому относятся к вихревой составляющей сопротивления. Попытка определить эту составляющую, принимая за её источник импульсное давление (удар) на форштевне, оказалась достаточно плодотворной. Описаны полученные на натурном судне «Меридиан» и в опытовом бассейне Новосибирской государственной академии водного транспорта (НГАВТ) доказательства существования удара в носу при движении судна с постоянной скоростью. Сделанные в опытовом бассейне НГАВТ видеосъёмки картины обтекания длинной аналитической модели позволили увидеть вихревую область и её влияние на смещение источника волнообразования к корме по мере увеличения скорости. Данная работа служит обоснованием нового направления теоретических и экспериментальных исследований, необходимых для получения метода расчёта полного сопротивления воды движению корабля.

Ключевые слова: импульсное давление, вихревое сопротивление, вихре – волновое взаимодействие

Vortex component of water resistance to ship movement. Ada Sh. Gotman.

Novosibirsk state academy for river fleet. Agotman@yandex.ru

The report presents the results of theoretical and experimental studies of wave and vortex components of the ship resistance. This study focused on the vortex component of resistance. It is necessary to note that Michell's integral provides an estimate only of Kelvin waves. Shock waves, breaking waves and wake associated with the viscous properties of the fluid and therefore belong to the vortex component of resistance. An attempt to define this component, taking as its source the pulse pressure (impact) on the stem, proved quite fruitful way. The experiments on the full-scale ship "Meridian" and in the towing tank of NSAWT have given proof of existence of the impact in the bow while the vessel moves with constant speed. Video shootings in the towing tank NSAWT of the flow pattern around the long analytical model allowed to see the vortex regions and their influence on the shift of wave generation source to the stern as the speed increases. This work justifies the new trend of theoretical and experimental studies necessary for development of calculating method of the total resistance of ships.

Keywords: pulse pressure, vortex resistance, vortex – wave interaction.

¹ *Готман Ада Шоломовна, член-корреспондент РАЕ и РИА, д.т.н., профессор кафедры теории и устройства корабля Новосибирской государственной академии водного транспорта.*



Введение

Вычисление полного сопротивления судна на тихой воде тесно связано с возможностью разделения полного сопротивления на составляющие. Впервые такое разделение было сделано В. Фрудом (1810–1879), чтобы разработать метод пересчёта результатов замера сил сопротивления модели на натурное судно. Фруд разделил полное сопротивление на сопротивление **трения и остаточное сопротивление**. При этом **остаточное** сопротивление он разделил на волновое, которое связано только с гравитацией, и на сопротивление формы, которое зависит от вязкости жидкости. Такое разделение связано не только с природой сил, но и особенностями воздействия этих сил на корпус судна. На поверхность движущегося корпуса судна действуют нормальные и касательные напряжения. Фруд не мог объединить сопротивление формы с сопротивлением трения, потому что сопротивление трения является равнодействующей касательных напряжений, а сопротивление формы – нормальных. Направление действия напряжений на корпус судна объединяет сопротивление формы с волновым. Именно выбранный Фрудом способ разделения на составляющие даёт наиболее удобную возможность пересчёта результатов модельных испытаний на натурное судно. Кроме того, это разделение вносит ясность в расчётное и экспериментальное изучение зависимости каждой из составляющей от параметров формы корпуса.

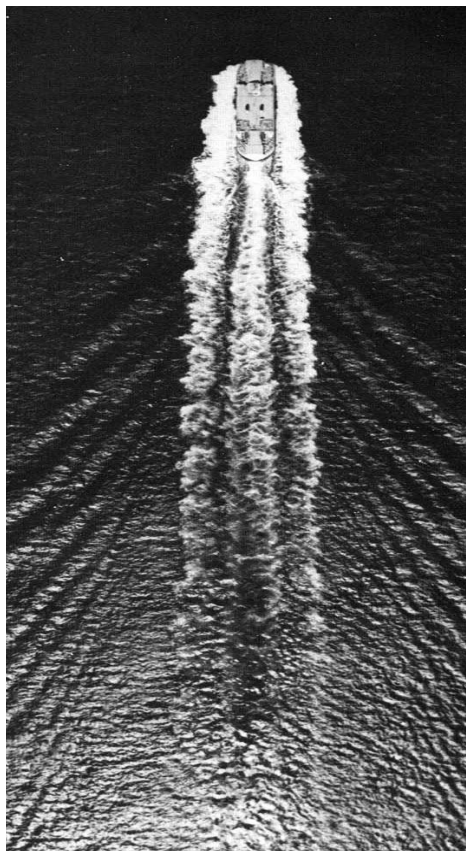


Рис. 1. Типичная картина вихре- и волнообразования вокруг корпуса движущегося судна

§ 1. Источники вихревого сопротивления

Проблема определения величины сопротивления воды движению судна практически не решена до сих пор. Проектант не может простым способом оценить сопротивление судна с заданной формой корпуса. Практически за более чем вековое изучение этого вопроса есть только два фундаменталь-



ных решения. Первое принадлежит Мичеллу¹ – это определение волнового сопротивления судна. Второе решение принадлежит Л.Прандтлю² – это определение сопротивления трения. Полученные с помощью его теории экстраполяторы трения решают задачу расчёта сопротивления трения. Подобного решения для определения третьей вихревой составляющей сопротивления пока нет.

Волновое сопротивление и сопротивление трения удалось посчитать только потому, что на корпусе движущегося судна были чётко указаны источники их образования. Следуя этому опыту, необходимо найти такие источники для определения вихревого сопротивления. Например, Л. Прандтль показал, что сопротивление трения связано с прилипанием частиц жидкости к поверхности корпуса и образованием вихревого пограничного слоя, и этой гипотезы оказалось достаточно, чтобы получить способ определения сопротивления трения с практически высокой точностью. Трение рассчитывается как сумма касательных напряжений по интегральному соотношению. Мичелл проинтегрировал нормальные давления, рассчитанные в зависимости от формы корпуса, и таким образом дал формулу для определения энергии кельвиновских волн в зависимости от формы корпуса.

С вихревой составляющей дело обстоит сложнее, потому что образование вихрей связано с вязкими свойствами жидкости, а их действие на корпус судна передаётся давлением, а не касательными напряжениями. Поэтому вихревая составляющая не может быть учтена при расчёте сопротивления трения. Она не может быть учтена также теорией Мичелла, потому что эта теория получена на основании допущения об отсутствии вязкости.

Если рассматривать три составляющие полного сопротивления судна с точки зрения визуальных наблюдений, то следует отметить, что в отличие от трения, которое невозможно видеть невооружённым глазом, волны и вихри хорошо видны (рис. 1³). Однако, если волны хорошо моделируются, видны в опытовом бассейне и даже могут быть измерены в процессе модельных испытаний, то вихревая картина в виде струй, брызго- и вихреобразований не моделируется. Например, если на натурном судне наблюдаются мощные струи, то на модели в лучшем случае можно увидеть некоторые завихрения. Тем не менее экспериментально доказано, что энергия вихреобразования, хоть и связана с вязкостью, зависит от числа Фруда. Это происходит потому, что она передаётся на корпус через нормальные давления.

Общепринятое мнение, что всё сопротивление формы (вихревое сопротивление) связано только с отрывом пограничного слоя в корме, вызвано тем, что величина так называемого сопротивления формы определяется из

¹ Michell, J.H. 1898. The wave resistance of a ship. *Philosophical Magazine*. –Ser. 5, **45**, 106–123.

² Л. Прандтль и О. Титъенс. Гидро- и аэромеханика, т. 1, 1933. ГТ-ГИ, М. –Л. 224 с., т.2, 1935. ОНТИ НКТП СССР, 313 с.

³ Фотография взята из «Альбома течений жидкости и газа» Ван Дайка. – М. «Мир», 1986 г., стр. 120.



сравнения эпюры распределения давления, полученного в идеальной жидкости, с экспериментальной кривой давления. Полученное расхождение эпюр давлений отмечается только в корме, и именно это расхождение считается сопротивлением формы. Тем не менее, даже на поверхностный взгляд из снимка на рис. 1 видно, что существует ожерелье вихрей, которое начинается в носу, идёт по бортам движущегося судна и не сливается с попутным потоком. Так что отрыв пограничного слоя в корме не может быть причиной идущего от носа ожерелья вихрей.

Так как вихри наблюдаются на свободной поверхности и связаны с её разрушением в виде брызгообразования, то источник вихревого сопротивления нужно искать в районе пересечения форштевня со свободной поверхностью воды. Для того чтобы выяснить, что происходит в этом районе, был выполнен специальный анализ.

Впервые энергию ожерелья вихрей численно оценил Е.Баба в 1969 году¹. Е. Баба замерил величину сопротивления, связанного с этим ожерельем вихрей, обнаружив его как потерю количества движения на контрольной плоскости за кормой вне попутного потока. Он назвал этот вихревой поток **разрушающимися волнами**. Величина сопротивления, связанная с «разрушающимися волнами», для модели танкера оказалась равной 15% от полного сопротивления. Ясно, что такой величиной в общем балансе сопротивления нельзя пренебрегать.

§ 2. Ударные волны

Намного позже, в 1980 г, Инуи, Мията и Кадзитани опубликовали работу² об ударных волнах на свободной поверхности (FSSW – Free Surface Shock Waves). Они показали, что в окрестности носа судна существуют ударные волны, которые отличаются от кельвиновских тем, что не распространяются за кормой и в стороны, а движутся вместе с судном (рис. 2) и, кроме того, имеют другую внутреннюю структуру.

На рис. 2 показана схема волновых и вихревых движений на поверхности потока вокруг движущегося судна. Ударные волны японские исследователи разделили на прямые (подпорные) и косые.

В течение нескольких лет Танада³ обрабатывал экспериментальные результаты визуализации потока на свободной поверхности вокруг кругового цилиндра и моделей судов полных форм. Он показал, что интенсивные вихревые потоки генерируются в носу и в корме, и назвал их *ожерельем вихрей* и *кормовым скачком вихрей* соответственно. Феномены, которые наблюдал Танада и изучал Баба, были ими рассмотрены с самого начала как

¹ Baba, E. 1969. A new component of viscous resistance of ships. *J. Soc. Nav. Arch. Japan*, 125, 23–34.

² Miyata, H., Inui, T., Kajitani, H. 1980a. Free surface shock waves around ships and their effects on ship resistance. *J. Soc. Nav. Arch. of Japan*, 147, 1–9 and *Nav. Arch. Ocean Engng.* 18, 1–9.

³ Taneda, S., Amamoto, H. 1969. Necklace Vortex around Bow. *Bulletin of the Research Institute on Applied Mechanics. Kyushu University, Japan*, 31.



потеря количества движения. Однако их объяснения изменялись по мере экспериментального изучения в опытовом бассейне университета Токио в течение двух с половиной десятилетий¹. Затем этот феномен и сопротивление, связанное с ним, были признаны как разрушение волн и как сопротивление разрушающихся волн соответственно.

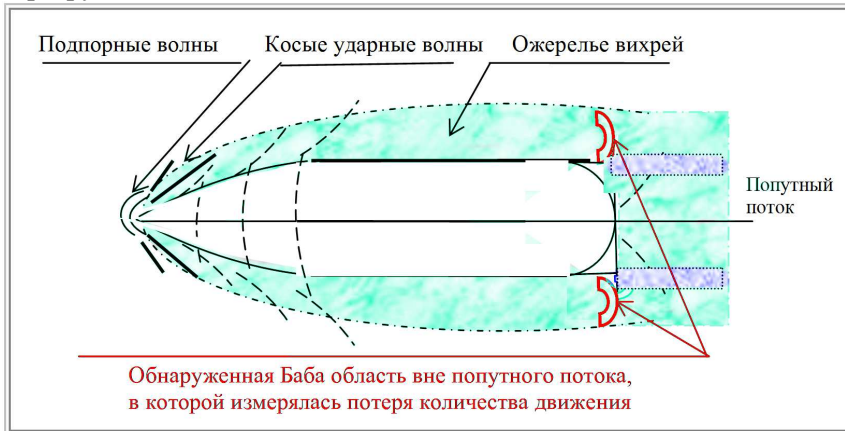


Рис. 2. Картина свободной поверхности вокруг движущегося судна

Работы Мията об ударных волнах встретили очень неоднозначное отношение из-за использования в наименовании «ударные волны» слова «удар». Этот вопрос рассмотрен в работе², где дано чёткое обоснование этой терминологии, поэтому здесь не приводится. Л.И. Седов³ дал такое определение удара в (или на) воде: «При изучении движений с резким изменением скорости точек системы в предельном случае мы приходим к рассмотрению движений с мгновенным скачкообразным изменением скорости. Эти предельные движения называются ударом». В описанных Мията волнах наблюдается поверхность, на которой происходит резкое изменение поля скорости, поэтому у Мията были основания назвать такие волны ударными, а у нас было основание предположить существование удара.

§ 3. История теории удара в расчётах сопротивления воды движению судна

Вопрос о существовании удара в носу движущегося судна возник не впервые. Существовала теория Ньютона расчёта полного сопротивления движению судна. Пьер Буге тоже использовал теорию удара в задаче определения сопротивления судна. Анализ этих и других работ был сделан в

¹ Inui, T. 1981. From Bulbous Bow to Free-Surface Shock Wave – Trends of 20 Years' Research on Ship Waves at the Tokyo University Tank. *J.Ship Res.* 25, 3, 147–180.

² Готман А. Ш., Краснов А. В., Краснов А. В. Изучение поведения воды в носовой оконечности движущегося судна. *Морские интеллектуальные технологии*, вып. 2 (12) 2011, 27–32.

³ Седов Л. И. 1950. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. *ГИТ-ТЛ*, 444 с.



2006 году Хорстом Новаки¹ в Берлинском институте истории науки в работе «Развитие теории механики жидкости и проектирования корабля до Трафальгарской битвы». Ниже приведены некоторые выдержки о теории удара из работы Х. Новаки.

«Ньютон в его книге “Начала”² (1687) получил зависимость сопротивления от некоторых главных параметров формы и при этом ввёл понятие искусственной “разреженной среды”. “Разреженная среда” представлена Ньютоном как корпускулярная среда, частицы которой имеют равную массу и равный размер и перемещаются в потоке на малые, но конечные расстояния. Ньютон принял гипотезу, что сопротивление движению возникает потому, что в этой “разреженной среде” частицы потока достигают предмета с неубывающей скоростью, ударяют во фронтальную часть поверхности предмета, а потом упруго отражаются без взаимодействия с другими частицами. Задняя сторона предмета и любые параллельные стороны, как в цилиндре, не подвержены ударам частиц и, следовательно, не дают вклада в сопротивление.»

«Монументальные работы Пьера Буге³ “*Traité du Navire*” (1746 г) и Леонарда Эйлера⁴ “*Scietia Navalis*” (1749 г) были написаны независимо и без знания предыдущих работ других авторов. Обе книги страдали из-за недостаточного развития механики жидкости в середине 18-го столетия. Пьер Буге развивал теорию сопротивления носовой оконечности, основанную на теории удара, но связанную с коэффициентами сопротивления из экспериментов, и использовал различное приближение для кормовой части. Эта схема была стандартизирована и принята Французским флотом для оценки формы носовой оконечности в новых проектах.»

«Эйлер в его “*Scientia Navalis*” более умеренно отнёсся к теории удара Ньютона и не отрицал её из-за отсутствия лучшего приближения. Эйлер сожалел, что сопротивлением кормовой части нельзя пренебречь, но не предложил никакого способа устранения этой трудности. Эйлер подчеркнул, что это приближение грубое, но его использовали до окончания 1755 г, пока Эйлер не предпринял мощную критику теории удара. Однако сам он не дал даже грубого приближения в популярной французской версии своей работы “*Théorie complete*” 1773 г.»

¹ Horst Nowacki 2006. Developments in Fluid Mechanics Theory and Ship Design before Trafalgar. *Max Plank Institute for the History of Science*. Preprint 308. Bibl 307, 65p.

² Newton, Isaak: “*Philosophiae Naturais Principia Mathematica*” (“*Mathematical Principles of Natural Philosophy*”), 1st ed. London, 1726. English translation by I.B. Cohen and A. Whitman, Univ. of California Press, Berkeley, 1999. German translation by Volkmar Schueller, Walter de Gruyter Publ., Berlin – New York, 1999.

³ Bouguer, Pierre 1746 *Tmité du Navire, de sa Construction et de ses Mouvemens*. Jombert, Paris.

⁴ Euler, Leonhard «*Théorie complete de la construction et de la manœuvre des vaisseaux*», St. Petersburg, Imperial Academy of Sciences, 1773. Reprinted in Euler’s *Collected Works*, Series II, vol. 21, W.Habitch (ed), Swiss Academy of Natural Sciences, Bern, Crell Fuessli Publ., Zurich, 1978.



Х. Новаки считает, что «решительный удар по «теории удара» был нанесён в 1736 году¹ новой концепцией для потока, направленного на плоскую пластину (нормально или под углом к направлению потока). Идея «отражения после удара» была заменена концепцией «отклонения перед контактом». Корпускулярный вид жидкой материи был оставлен в пользу модели криволинейных линий тока. Это дало мощный толчок для развития теории поля в механике сплошной среды.

Судя по этой исторической справке, было полностью отброшено представление об ударном характере сопротивления воды движению судна. Однако невозможно принять теорию Л. Эйлера о плавном обтекании движущегося судна, глядя на картину вихрей вокруг движущегося судна (см. рис. 1). При вычислении вихревой составляющей сопротивления судна необходимо учитывать ударный характер её образования.

В настоящее время выполняется анализ ударной теории Ньютона и делается попытка использовать её для того, чтобы получить хотя бы грубую оценку полного сопротивления судна. Ньютон предположил, что в носовой оконечности образуется ударный слой. Давление, оказываемое этим ударным слоем на корпус судна, Ньютон² определял по формуле $p_s - p_\infty = \rho_\infty U^2 \sin^2 \theta_b$, где θ_b – угол наклона касательной вдоль ударного слоя. Таким образом, в этой формуле учитывается не только угол входа, но и кривизна носовой оконечности. Используя содержание формулы Ньютона для определения силы сопротивления, расчётная формула принята в виде

$$R = \rho \cdot v^{k_1} \sin^2 \alpha \cdot k_2 S_b, \quad (1)$$

где S_b – площадь ударного слоя, α – угол входа действующей ватерлинии. Коэффициент k_1 отражает зависимость полного сопротивления от числа Фруда. Оказалось, что зависимость полного сопротивления судна от скорости не является квадратичной. На разных числах Фруда коэффициент k_1 меняется в пределах $2 < k_1 < 3$ в зависимости от угла входа действующей ватерлинии. Коэффициент k_2 отражает величину площади, охваченной ударом. Понятно, что чем больше угол входа, тем короче по длине судна площадь ударного слоя. Коэффициенты k_1 и k_2 находят путём обработки большого количества экспериментальных данных, полученных для реальных судов и их моделей путём сравнения расчётной кривой с экспериментальной. В первом же приближении выявилась зависимость коэффициента k_1 от угла входа действующей ватерлинии. Коэффициент k_2 зависит от скорости движения и от угла входа α . В настоящее время старший преподаватель кафедры ТУК

¹ Bernoulli, Daniel: «De legibus quibusdam mechanicis, quas natura constanter affectat, nondum descriptis, earum usu hydrodynamico, pro determinanda vi venae contra planum incumbentis» («on certain mechanical laws not yet described, which nature constantly applies on their hydrodynamic use for determining the force of a free jet striking on a planar plate»), Comm. Acad. Petrop., vol. VIII, 1736.

² Hayes W. D., Probstein R. F., 1959. *Hypersonic flow theory*. Academic press, New York, London.



НГАВТ М. А. Титов выполняет численный анализ для разных судов, чтобы получить зависимости для коэффициентов $k_1 = f_1(Fr)$ и $k_2 = f_2(\alpha, Fr)$. Это исследование проводится в диапазоне тех чисел Фруда, которые типичны для обычных речных и морских транспортных судов в пределах $0,16 < Fr < 0,33$. Предполагается, что формула (1) сможет дать возможность получить хорошую оценку полного сопротивления на стадии эскизного проектирования обводов корпуса судна.

§ 4. Как возникла гипотеза об ударе в носу судна при его стационарном движении

1

Поиски источника вихреобразования начались с анализа известных экспериментов, связанных с изучением волнового сопротивления и определением взаимодействия волнового сопротивления и пограничного слоя судна.

Разделение полного сопротивления движущегося судна на составляющие так или иначе условно, поэтому требовалось выяснить, влияет ли вязкость жидкости на волновую составляющую сопротивления, а также есть ли взаимное влияние корабельных волн и пограничного слоя корпуса судна.

Существуют результаты нескольких экспериментов, связанных с попыткой выяснить влияние пограничного слоя на волновое сопротивление. Хронологически первым было исследование, выполненное Е. Баба¹ в 1969 году. Е. Баба увеличивал толщину пограничного слоя модели путём изменения шероховатости поверхности корпуса модели и убедился, что влияние толщины пограничного слоя на волновую составляющую сопротивления пренебрежимо мало.

Хорошо известен эксперимент Вейнблюма, Кендрика, Годда² 1952 г с длиной (отношение $L/B \approx 37,7$) шестиметровой цилиндрической симметричной относительно миделя моделью, который показал, что при таком большом удлинении горбы и впадины расчётной кривой Мичелла совпадают с горбами и впадинами экспериментальной кривой остаточного сопротивления модели. В 1969 г Шарма³ провёл подобный эксперимент на модели с $L/B=20$ и получил кривую с горбами и впадинами, совпадающими с кривой Мичелла, начиная с $Fr=0,2$. Однако никто не обратил внимание на то, что у таких длинных моделей хорошо развит пограничный слой, который должен был бы влиять на корабельные волны, но эксперименты показали, что если такое влияние и есть, то оно ничтожно мало. Совпадение расчётной кривой волнового сопротивления с кривой остаточного сопротивления возможно

¹ Baba, E. 1969. Study on separation of ship resistance components. *J. of Society Nav. Arch. Japan*, 125, 9–22.

² Weinblum, G.P., Kendrick J.J. & Todd M.A. 1952. Investigation of wave effects produced by a thin body – TMB.

³ Sharma, S.D. 1969. Some results concerning the wavemaking of a thin ship. *J. Ship Research*, 13, 72–81.



только в том случае, если вода ведёт себя как идеальная. Следовательно, из этих экспериментов ясно, что пограничный слой практически не влияет на волновое сопротивление.

Многократно описанный нами эксперимент с тандемом двух стоек¹, между которыми нет корпуса судна, а следовательно, и пограничного слоя, показал явное влияние вязкости на волновое сопротивление. Тогда-то и возник вопрос об источнике этого влияния. Если не через пограничный слой судна, то каким образом вязкость влияет на волновую картину корабля?

Анализ всех этих экспериментов привёл к гипотезе о существовании **удара в носу**. Стало ясно, что всё дело в угле входа носа судна. Если угол входа ватерлиний очень мал, то вода плавно обтекает корпус судна, если же нос тупой (а у стоек был почти прямой угол входа), то при входе носа в невозмущённую воду жидкость резко выводится из состояния покоя. Вода получает ускорение, и в районе пересечения форштевня со свободной поверхностью происходит резкое увеличение **давления (удар)**, приводящее к турбулизации потока вокруг корпуса судна или модели.

Основное возражение против идеи существования удара в носу обычно состоит в том, что удар – это нестационарное явление, а судно движется с постоянной скоростью, следовательно, все процессы должны рассматриваться как стационарные. Однако следует учитывать, что при входе судна в невозмущённую воду за малый промежуток времени вода должна подняться, отразиться от поверхности носа и разрушиться. Например, если скорость движения судна 36 км/час, то время на подъём воды равно $t=v/g \approx 1$ сек. Так за одну секунду жидкость выводится из состояния покоя. В этот процесс вовлекаются всё новые и новые объёмы жидкости, поэтому наблюдается периодический подъём и отбрасывание жидкости в виде струй. Этот процесс явно нестационарный.

Вообще говоря, существование удара в носу движущегося судна не может быть опровергнуто теорией Л. Эйлера и Д. Бернулли безударного обтекания. Известен парадокс Дюбуа о том, что сопротивление тела, движущегося с постоянной скоростью в покоящейся жидкости, больше сопротивления неподвижного тела в натекающем на него с той же скоростью потоке. Есть разные объяснения этого парадокса, но наше объяснение состоит в том, что при движении тела в неподвижном потоке жидкость перед носом судна приобретает скорость за очень маленький промежуток времени, что по Л. И. Седову называется ударом в жидкости. Если угол входа ватерлиний судна большой, то перед самым носом между расходящимися линиями тока имеется застойная зона, покрытая подпорными волнами и мелкими вихрями. Для образования такой зоны необходим удар и отражение жидкости от поверхности носовой оконечности судна.

¹ А. Ш. Готман, 2009. Проблемы изучения потока в окрестности носовой оконечности движущегося судна. Доклады научно-технической конференции «Проблемы мореходных качеств судов, корабельной гидромеханики и освоения шельфов», XVIII Крыловские чтения. СПб., 25–27.



Рис. 3. Длинная модель движется вперёд тупой оконечностью

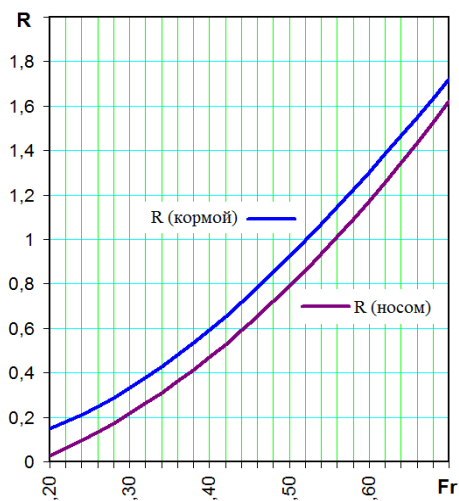


Рис. 4. Экспериментальные кривые сопротивления длинной несимметричной модели

Для проверки гипотезы о существовании и значении удара в носу судна в опытовом бассейне НГАВТ был выполнен эксперимент с длинной узкой моделью (длиной 2,5 м шириной 0,05 м отношение $L/B=50$), имеющей оконечности разной формы. Одна оконечность имела эллиптическую форму, а другая – острую параболическую (рис. 3). Очевидно, что если основную роль играет срыв пограничного слоя, то сопротивление при движении вперёд острым концом должно быть больше, так как срыв пограничного слоя с эллиптической кормы больше, чем с параболической. Однако эксперимент показал обратный результат, чем подтвердил выдвинутую гипотезу о важной роли **импульсного давления**¹ в носу судна.

Для подтверждения гипотезы о существовании удара в носу был проведен натурный эксперимент на судне НГАВТ «Меридиан». Судно «Меридиан» имеет следующие размерения: $L_{pp}=40,6$ м, $B=6$ м, $T=1,46$ м. Наименьшая его скорость ≈ 10 км/час, наибольшая ≈ 20 км/час. Эксперимент проводился на числах Фруда $Fr \approx 0,14$, $Fr \approx 0,278$ и ещё на одном промежуточном числе Фруда. Испытания проходили в районе Обского моря за шлюзами аванпорта на тихой воде вечером 26 июля 2010 г.

С палубы форштевень не виден, поэтому на видеокамеру записывалось отражение форштевня в зеркале. У судна «Меридиан» нос острый. Тем не менее даже у этого острого носа наблюдалось периодическое отбрасывание струй. Это видно на фотографии рис. 5.

Таким образом, эксперимент дал ответ на вопрос, во-первых, о периодичности явления и, во-вторых, о форме, которую принимает жидкость при

¹ Наименование «импульсное давление» вместо слова «удар» предложено аспирантами братьями Красновым А.В. и Красновым А.В.



ударе форштевня. На фотографии видно, что на форштевне вода поднимается и отбрасывается в виде струй. При отбрасывании струй воды в районе форштевня происходит периодическое увеличение и уменьшение давления на обшивку, которое должно восприниматься как удар. Частота отбрасывания струй в носу и частота ударов, записанных в трюме возле форштевня на диктофон, совпали, что подтвердило их непосредственную связь.



Рис. 5. Кадр из видеofilьма. В зеркале видна отброшенная струя в точке пересечения форштевня со свободной поверхностью

Итак, натуральный эксперимент подтвердил существование периодических ударов в носу судна при движении с постоянной скоростью. Наблюдения показали, что вызванные этими ударами струи разбрызгиваются и турбулизуют свободную поверхность. Это подтвердило идею о зависимости турбулизации подповерхностного пограничного слоя волнового поля от удара на форштевне.

§ 5. О взаимодействии ожерелья вихрей и носовых корабельных волн



Рис. 6. Экспериментальная и расчётные кривые модели Виглея 1846А

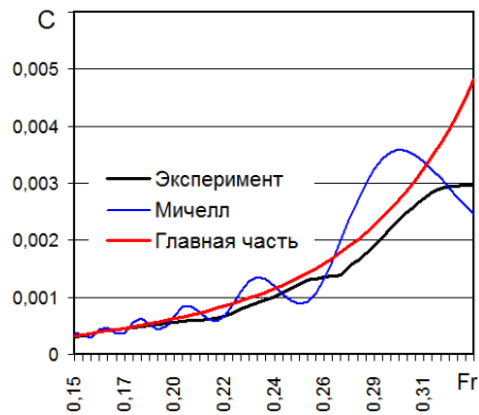


Рис. 7. Экспериментальная и расчётные кривые модели Вейнблума 1113

На рисунках 6 и 7 показано взаимное положение расчётной кривой волнового сопротивления и экспериментальной кривой остаточного сопротивления для двух моделей из серий Виглея и Вейнблума. Если учесть, что остаточное сопротивление равно сумме вихревого и волнового, то первый



вопрос, который возникает, это вопрос о том, каким образом расчётная кривая, полученная в предположении идеальности жидкости, может оказаться выше кривой остаточного сопротивления.

Остаточное сопротивление может оказаться меньше расчётного волнового сопротивления только в том случае, когда взаимодействие волн и вихрей на свободной поверхности приводит к гашению высоты корабельных волн (волновое сопротивление пропорционально квадрату высоты волн).

Для анализа выбраны результаты серийных испытаний аналитических моделей, выполненных в двадцатые и тридцатые годы прошлого века Виглеем и Вейнблумом. Данные для таблиц 1 и 2 взяты из обзорной статьи¹, в которой выполнен большой анализ расчётных и экспериментальных данных по волновому сопротивлению судов и моделей. Виглей и Вейнблум проверяли возможность использования интеграла Мичелла для оценки волнового сопротивления.

Так как у разных моделей при одинаковых главных размерениях взаимное положение расчётной кривой волнового сопротивления и кривой остаточного сопротивления разное, то можно сделать вывод, что вихреволновое взаимодействие в основном зависит от параметров формы корпуса.

Таблица 1

Сравнение положения расчётной кривой главной части интеграла Мичелла R_w и экспериментальной кривой остаточного сопротивления R_{OST} аналитических моделей Виглея. Анализируется связь между взаимным положением этих кривых и углом входа, числом Фруда и коэффициентами полноты.

Модели Виглея	Угол входа α	β	δ	φ	$Fr < 0,3$	$Fr > 0,3$
1846а	17°41'	0,666	0,498	0,747	$R_w \gg R_{ost}$	-
2130 а (несимметр)	15°42' 5°18'	0,943	0,700	0,658/ 0,742	$R_w \gg R_{ost}$	$R_w \gg R_{ost}$
1846 b	13°31'	0,666	0,462	0,693	$R_w > R_{ost}$	$R_w < R_{ost}$
N43	13°31'	0,909	0,799	0,879	$R_w \gg R_{ost}$	$R_w < R_{ost}$
Parabolic	11°20'	0,556	0,444	0,667	$R_w > R_{ost}$	$R_w \approx R_{ost}$
1970b	11°20'	0,667	0,467	0,700	$R_w > R_{ost}$	-
829	9°05'	0,667	0,427	0,640	$R_w \approx R_{ost}$	$R_w < R_{ost}$
1970 с	5°45'	0,671	0,467	0,700	$R_w > R_{ost}$	$R_w > R_{ost}$
2038 с малая осадка	5°18'	0,666	0,400	0,600	$R_w < R_{ost}$	-
1805 а	4°17'	0,666	0,391	0,587	$R_w < R_{ost}$	$R_w > R_{ost}$
1805 b	0°00'	0,666	0,355	0,533	$R_w < R_{ost}$	$R_w \approx R_{ost}$

¹ Gotman, A.Sh. 2002. Study of Michell's Integral and influence of viscosity and ship hull form on wave resistance. *Oceanic Engineering International*, **8**, No 2, pp 74–115.



Таблица 2

Сравнение положения расчётной кривой главной части интеграла Мичелла R_w и экспериментальной кривой остаточного сопротивления R_{OST} аналитических моделей Вейнблума. Анализируется связь между взаимным положением этих кривых и углом входа, числом Фруда и коэффициентами полноты.

Модели Вейнблума	Угол входа α	β	δ	Φ	$Fr < 0,25-0,3$	$Fr > 0,3$
1113	13°35'	0,839	0,5787	0,689	$R_w > R_{ost}$	-
1100	13°30'	0,839	0,579	0,690	$R_w > R_{ost}$	-
1110	13°30'	0,839	0,5506	0,656	$R_w \approx R_{ost}$	-
1097	13°30'	0,75	0,5425	0,723	$R_w > R_{ost}$	-
1136	13°30'	0,929	0,619	0,666	$R_w > R_{ost}$	-
1112	11°20'	0,839	0,5425	0,647	$R_w < R_{ost}$	$R_w < R_{ost}, Fr > 0,25$
1093	9°05'	0,75	0,5196	0,692	$R_w < R_{ost}$	-
1098	7°56'	0,75	0,5196	0,692	$R_w \approx R_{ost}$	-
1114	7°48'	0,839	0,55	0,656	$R_w < R_{ost}$	$R_w > R_{ost}, Fr > 0,25$
1111	6°10'	0,839	0,5425	0,647	$R_w < R_{ost}, Fr > 0,25$	$R_w > R_{ost}, Fr > 0,25$

Зависимость от формы корпуса удалось получить, расположив модели в порядке убывания угла входа действующей ватерлинии α . Одновременно указаны коэффициент полноты миделевого сечения β , коэффициент общей полноты δ и призматический коэффициент ϕ . Влияние призматического коэффициента выявилось благодаря нарушению закономерности в соотношении между положениями расчётной кривой главной части интеграла Мичелла и экспериментальной кривой остаточного сопротивления (модель Виглея 1846б и модели Вейнблума 1110).

В правой части таблиц показано соотношение между экспериментальными кривыми остаточного сопротивления и расчётными кривыми главной части интеграла Мичелла. Главная часть интеграла Мичелла – это та часть сопротивления, которая не учитывает взаимодействия носовой и кормовой систем корабельных волн.

Взаимодействие вихрей с волнами – очень сложное явление, поэтому трудно дать ему точную численную оценку. В настоящее время на основании данных, приведённых в таблицах 1 и 2, можно говорить только о том, что это взаимодействие явно зависит от угла входа главной ватерлинии и призматического коэффициента. Чем меньше угол входа действующей ватерлинии, тем меньше расчётное значение волнового сопротивления, тем меньше импульсное давление в носу и менее интенсивный вихревой слой. Судя по тому, что при малых углах входа ватерлиний кривая волнового сопротивления проходит ниже кривой остаточного, можно заключить, что большую часть остаточного сопротивления составляет вихревая составляющая и при этом взаимодействие волн и вихрей невелико. Конечно, влияют на эти процессы такие параметры формы корпуса, как кривизна поверхности носовой оконечности и форма кормовой, но в данном анализе эти параметры не учитывались.



§ 6. Экспериментальное исследование вихреобразования

Для определения роли удара в носу модели в опытовом бассейне проводятся испытания серии аналитических моделей с замерами давления на корпусе в районе форштевня. Первая из этой серии модель имеет длину $L=2,8$ м, ширину $B=0,1$ м. Модель представляет собой вертикальный цилиндр с параболической носовой оконечностью и эллиптической кормовой.

Датчики давления вставлены заподлицо с поверхностью корпуса, чтобы не нарушались гладкость поверхности и поток обтекания. На стоп-кадрах № 4 и № 8 видны выведенные на измерительный прибор концы проводов от датчиков давлений.

Результаты измерений показаны на рис. 8. Резкое изменение давления прямо на форштевне подтвердило существование **импульсного давления (удара)**. На фотографии рис. 9 ясно видны две вихревые области (светлые), начинающиеся на форштевне и примыкающие к бортам. От кормовых концов этих областей отходят расходящиеся волны.

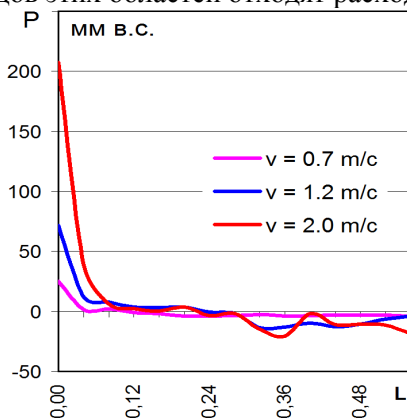


Рис. 8. Распределение давления на модели на глубине 0,1 м при осадке 0,2 м (опытовый бассейн ИГАВТ). Эксперимент выполнен Красновым А.В. и Красновым А.В. – аспирантами кафедры ТУК



Рис. 9. Кадр из видеопленки, снятого во время движения длинной аналитической модели. Эксперименты проводят аспиранты Краснов А. В. и Краснов А. В.

В ПРИЛОЖЕНИИ 1 показаны стоп-кадры видеосъемок в порядке возрастания скорости. Видно, как на малой скорости возникает подпорная волна. Затем угол при её вершине уменьшается по мере возрастания скорости и появляется вихревая зона. Затем вихревая зона удлиняется, захватывая всё большую область вдоль носовой оконечности. Кроме того, эта вихревая зона отодвигает вершину носовой кельвиновской системы волн.

Известно, что когда длина поперечных волн кельвиновской носовой системы становится равной длине модели (или судна), то носовая и кормовая системы сливаются, и от корпуса отходит одна кельвиновская система волн. Корпус в этом случае действует как один источник. На стоп-кадре



№16 хорошо видно, что почти вся длина захвачена вихревой зоной и от модели отходит одна кельвиновская система волн.

В данной статье приводятся результаты испытаний только первой из серии аналитических цилиндрических моделей. Все модели серии имеют одинаковую длину и ширину. Они отличаются только формой носовой оконечности при постоянной форме кормовой. У данной модели самый большой угол входа действующей ватерлинии.

Заключение

Вышеприведенный анализ, а также экспериментальное изучение в опытовом бассейне и на натурном судне показали, что источником вихревой составляющей сопротивления судна, выражающегося в виде ожерелья вихрей, является импульсное давление (удар) в районе пересечения форштевня со свободной поверхностью. Влияние кормового скачка вихрей (по определению Танада) в данной работе не исследовалось.

Если судить по площади вихревых зон на рис.1, то можно заметить, что ожерелье вихрей, начинающееся в районе форштевня, существенно интенсивнее, образуящегося в корме попутного потока. Судя по этой фотографии, вихревые потоки больше зависят от скорости, чем от формы оконечностей корпуса судна. Конечно, для окончательных выводов необходимо выполнить большой объём испытаний масштабных серий аналитических моделей с тщательными замерами в вихревых зонах как вдоль корпуса, так и в корме.

Анализ взаимного положения расчётных кривых волнового сопротивления и кривых остаточного сопротивления серий моделей Виглея и Вейнблума позволил сделать вывод о существовании взаимодействия ожерелья вихрей с системой корабельных волн. Удалось выявить зависимость этого взаимодействия от угла входа действующей ватерлинии и призматического коэффициента. Оказалось, что чем меньше угол входа и призматический коэффициент, тем меньше волно- и вихреобразование, тем меньше их взаимное влияние. Судя по модели 2038с, при малой осадке близость днища к свободной поверхности оказывает на неё существенное воздействие.

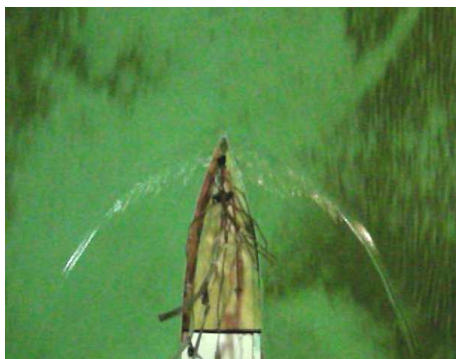
Для того чтобы получить метод расчёта полного сопротивления как сумму волнового, вихревого и трения, необходимо найти способ расчёта вихревой составляющей сопротивления, а также способ расчёта взаимодействия волнового и вихревого сопротивления.

Для оценки взаимодействия волн и вихрей требуется серия целенаправленных испытаний достаточно большого объёма. На данной стадии только поставлена проблема и намечены пути её решения. Сейчас трудно сказать, возможно ли теоретическое решение данной задачи.

Замечание. Изготовление моделей, измерительной аппаратуры и проведение экспериментов § 6, выполнены аспирантами кафедры ТУК в опытовом бассейне НГАВТ в течение 2012 и первых месяцев 2013 года.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Эксперименты выполняются аспирантами Красновым А. В. и Красновым А. В. в опытном бассейне Новосибирской государственной академии водного транспорта.



Стоп-кадр №4. Число Фруда $Fr=0,16$



Стоп-кадр №8. Число Фруда $Fr=0,24$

1



Стоп-кадр № 9. Число Фруда $Fr=0,265$



Стоп-кадр № 11. Число Фруда $Fr=0,31$



Стоп-кадр № 14. Число Фруда $Fr=0,38$



Стоп-кадр № 16. Число Фруда $Fr=0,40$