

О ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ СНИЖЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДЫ ДВИЖЕНИЮ ТЕЛ

© Э.Л.Амромин, В.А.Бушковский, А.Ю.Яковлев

Центральный научно-исследовательский институт им.А.Н. Крылова,
196158 Санкт-Петербург, Россия
(Поступило в Редакцию 17 января 1995 г.)

Введение

Техническая проблема снижения сопротивления воды движению судов и других тел в инженерной практике всегда решается как задача [1,2] улучшения некоторого реального прототипа при ограничениях на его форму, которые являются совершенно посторонними для математической физики. Однако теоретическая информация о предельно низких значениях составляющих сопротивления, полученная на упрощенных и даже абстрактных с точки зрения конструктора примерах, безусловно полезна для инженерного искусства и как идеал, и как контроль для предварительных оценок новых проектных идей, производимых обычно с помощью весьма приближенных методов.

Проверенный более чем столетним использованием принцип разделения сопротивления [3] на волновую и вязкостную компоненты позволяет порознь рассмотреть задачи их минимизации. При этом линейная теория волн допускает [4,5] существование дискретного набора режимов движения тел вблизи поверхности воды вовсе без волнового сопротивления. Снижение же вязкостного сопротивления наиболее эффективно достигается разделением поверхностей тела и воды с помощью слоя газа (например, воздуха), т.е. созданием на теле кавитационной каверны, накрывающей возможно большую часть его поверхности при пренебрежимо малых собственно кавитационных потерях [3]. В настоящей работе показано, что нелинейная теория волн подтверждает возможность снижения до нуля волнового сопротивления в плоских потоках, а следовательно, возможность полностью избавиться от поперечных волн в следе судна и показано, какая доля волнового сопротивления реальных судов остается принципиально неустранимой, поскольку порождена расходящимися (носовыми) волнами. В результате решения нелинейной кавитационной задачи получена оценка возможного снижения вязкостного сопротивления при наиболее благоприятных условиях формирования каверн на теле.

1. Снижение вязкостного сопротивления подразумевает прежде всего уменьшение смоченной водой поверхности тела, поэтому естественно анализировать предельное снижение именно для тел вращения, площадь поверхности которых будет наименьшей среди прочих тел тех же объемов и длин. Это оказывается также удобным для вычислений, поскольку можно воспользоваться более простым математическим аппаратом и расчетными схемами для осесимметричных задач теории кавитационных течений. Одна из этих схем, названная обобщенной схемой Рябушинского [3], подразумевает рассмотрение каверн, расположенных между двумя телами, или же тел, средняя часть которых

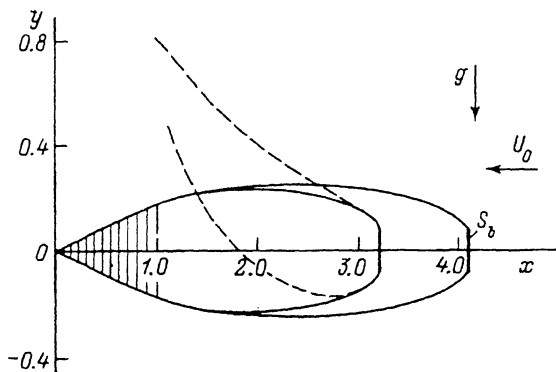


Рис. 1. Меридиональное сечение тел с покрытой каверной средней частью. Сплошные линии — $Fr \rightarrow \infty$, штриховые — $Fr = 1$, поверхность S_c заштрихована.

накрыта каверной. Задача определения размеров и формы таких каверн обычно сводится к следующей нелинейной краевой задаче для потенциала скорости Φ :

$$\Delta \Phi = 0; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial N} \right|_S = 0; \quad (\nabla \Phi_1 \nabla \Phi) \Big|_{S_c} = 1 + \sigma; \quad \nabla \Phi \xrightarrow{x \rightarrow -\infty} \{1, 0\}. \quad (1)-(4)$$

где $S = S_b + S_c + S_p$; S_c — поверхность каверны; S_b — носовой части тела; S_p — хвостовой; N — нормаль к S ; σ — постоянная, называемая числом кавитации.

При заданных форме S_b длине S_c и законе изменения N на S_p форма S_c , ширина S_p и значение σ будут определены в ходе решения задачи.

Отсылая к [6] за описанием метода численного решения нелинейной краевой задачи (1)–(4), здесь надо отметить, что чем круче отходит образующая S_b от оси симметрии течения, тем больше отношение площади S_c к площади S_b . Взяв в качестве S_b диск, можно получить одно из наибольших значений этого отношения. Формально можно было бы выбрать диском и S_p , поскольку уравнения теории потенциала позволяют сделать это. Однако реальный поток вязкой жидкости сорвался бы с такой кормовой оконечности, что привело бы к резкому увеличению [3] сопротивления. Вполне плавное обтекание кормы с медленным, но в итоге значительным возрастанием давления в ней (и следовательно, с наименьшим сопротивлением формы) может быть обеспечено выбором в качестве S_p конуса с небольшим углом α при вершине. Типичные формы меридиональных сечений составленных таким образом поверхностей S приведены на рис. 1. Накрытая каверной часть тела должна быть близка к S_c , а доля площади S_b очень мала. Увеличение угла α приведет к некоторому уменьшению сопротивления трения при возрастании сопротивления формы и угрозе отрыва пограничного слоя. Точное значение выигрыша в сопротивлении будет зависеть от значения числа Рейнольдса, при котором происходит обтекание, от шероховатости поверхности тела и т. д. Данные же, представленные на рис. 1, позволяют заявлять о максимальном выигрыше в 70–78% для тел удлинения 6.5–8.5, что соответствует $\sigma = 0.06–0.08$. Такие удлинения тел обычны в практике судостроения.

2. Наиболее примитивной из математических моделей судна, пригодных для анализа интерференции корабельных волн, индуцируемых различными его частями, является пара источник-сток одной и той же обильности. Если поместить их в тех поперечных сечениях, площадь которых равна половине наибольшей из подобных площадей, то такое моделирование удовлетворительно опишет интерференцию поперечных волн для судов без носовых бульбов и тому подобных особенностей в распределении этих площадей (т. е. особенностей "строевой по шпангоутам" [3]). При этом используется теория потенциальных течений, т. е. движение жидкости описывается уравнением (1) с граничным условием (4), условие (2) выставляется на поверхности воды и на дне (при $y = -H$). Условие же постоянства давления на свободной поверхности имеет вид не [3], а

$$(\nabla\Phi_1 \nabla\Phi) - 1 = 2gyV_0^{-2}, \quad (5)$$

где V_0 — скорость набегающего потока, g — ускорение свободного падения. Потенциал Φ включает в себя, в частности, потенциал источника и стока обильности Q , расположенных на расстоянии L между собой и на глубине T под невозмущенным уровнем воды.

Нелинейная задача (1), (2), (4), (5) близка к задаче (1)–(4), и метод [7] ее решения схож в основных чертах с методом [6]. Снова опуская вычислительные детали, здесь только демонстрируют такие решения волновой задачи, для которых условие (4) будет выполнено и при $x \rightarrow \infty$, т. е. плоские волны на некотором расстоянии за телом затухнут без потерь и, таким образом, энергия на волновое сопротивление не будет расходоваться.

Представленные на рис. 2 формы поверхности воды подтверждают существование таких "безволновых" решений нелинейной потенциальной задачи, и, как в [7], таких решений оказывается несколько для одной и той же тройки $\{Q, T, L\}$. Не анализируя, какое из этих решений более физично, отметим только, что, хотя все они соответствуют тому же значению безразмерного параметра $F_r = V_0(gL)^{-0.5} = 0.426$, значение это существенно отличается от предсказаний линейной теории [4] $F_r = 0.5$ (в частности, из-за влияния дна на длину волн [8]).

Предположение о возможности устранения поперечных волн в следе судна позволяет оценить долю расходящихся волн при использовании метода [9]. Для этого интегрирование при вычислении волнового сопротивления производится только вне угла Кельвина. Тогда, выбирая в качестве L при построении F_r длину судна, в формуле для коэффициента сопротивления C_w

$$C_w = C_1 \int_{\text{tg } \theta_0}^{\infty} \Psi(u) du \quad (6)$$

используют $\theta_0 = 19^\circ$, а не обычное $\theta_0 = 0$. Здесь C_1 — указанная в [9] константа, а Ψ пропорциональна квадрату амплитуды волн. Вычисления по формуле (6) позволяют построить рис. 3, на котором показана

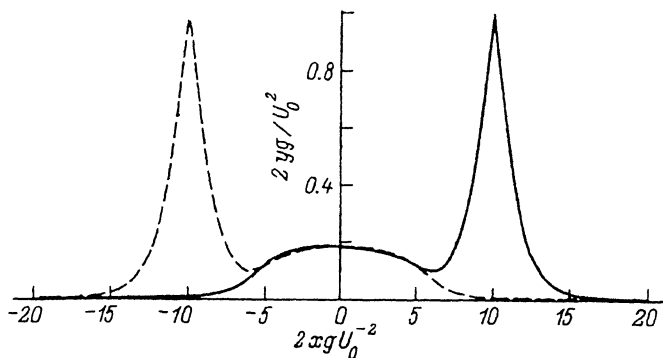


Рис. 2. Безволновые решения нелинейной задачи для источника и стока для $Fr = 0.426$, $T/L = 0.073$, $H/L = 0.109$, $Q/U_0 = 0.045$.

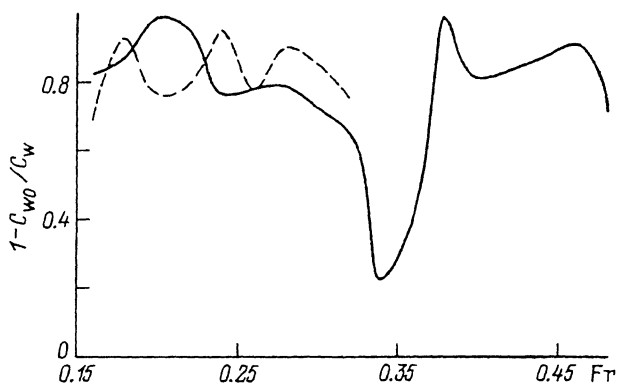


Рис. 3. Доля поперечных волн в волновом сопротивлении судна с заостренным носом (сплошная линия) и короткого судна с носовым бульбом (штриховые).

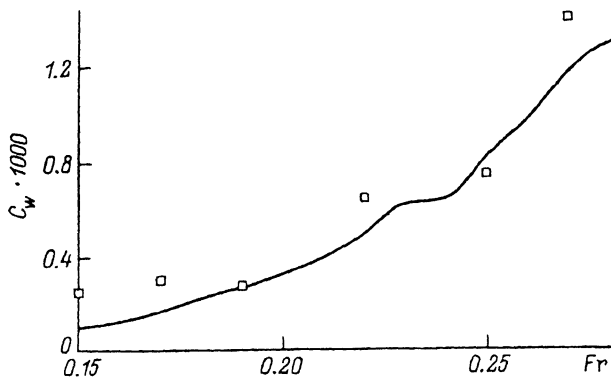


Рис. 4. Сопоставление расчета методом [9] и опыта для волнового сопротивления современного транспортного судна.

доля сопротивления поперечных волн для современного судна с носовым бульбом и для традиционного судна с заостренным носом. Очевидно, что возможный выигрыш зависит прежде всего от значения F_T и, как отмечено в [4], может быть значителен только в малых окрестностях дискретного набора благоприятных F_T .

3. Степень достоверности последнего прогноза связана с точностью вычисления C_w . Приведенное на рис. 4 сопоставление расчета и опыта дает необходимую для оценки этой достоверности информацию, относящуюся к одному из самых тяжелых примеров. Там представлен расчет для транспортного судна полной формы. Для судов меньшей полноты соответствие теории [9] опыту лучше, чем на рис. 4.

Сложнее с достоверностью оценок возможного снижения трения прежде всего из-за влияния значения F_T на форму каверн. На рис. 1 сплошными линиями представлены формы для предельного случая $F_T^{-1} = 0$. При любом ненулевом F_T происходит некоторое всплытие каверны, сопровождаемое увеличением площади смоченной поверхности, т.е. S_p , и тот же рис. 1 дает представление о искривлении каверн за диском при $F_T^{-1} = 1$, более характерном для высокоскоростных судов, а при меньших F_T это искривление будет большим, поскольку всплытие оси каверны пропорционально F_T^{-2} . Поэтому в практике судостроения при небольших F_T используются несколько [3] поверхностей S_b , взаимное расположение которых связано также со значением F_T .

Таким образом, даже принципиальные возможности снижения формально не зависящего от F_T сопротивления трения фактически будут зависеть прежде всего от значения F_T . Однако конкретное уточнение этой оценки для конкретных F_T увело бы нас от целей данной заметки.

Список литературы

- [1] Amromin E.L., Mizin I.O., Pashin V.M., Timoshin Yu.S. // Intern. Symp. on Ship Hydrodynamics and Energy Saving. El-Pardo, 1983. P. 1-9.
- [2] Амромин Э.Л., Бушковский В.А. // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 3. С. 92-100.
- [3] Справочник по теории корабля. Т. 1. Л.: Судостроение, 1986.
- [4] Tuck E.O. // J. Ship Res. 1991. Vol. 35. N 4. P. 277-287.
- [5] Tulin M.P., Tuck E.O. // VII Intern. Workshop Water Wave and Floating bodies. Val de Reull, 1992. P. 275-279.
- [6] Амромин Э.Л. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 4. С. 194-199.
- [7] Амромин Э.Л., Басин М.А., Бушковский В.А. // ПММ. 1990. № 1. С. 162-165.
- [8] Амромин Э.Л., Иванов А.Н., Садовников Д.Ю. // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 4. С. 125-129.
- [9] Amromin E.L., Lordkipanidze F.N., Timoshin Yu.S. // J. Ship Res. 1993. Vol. 37. N 1. P. 8-12.