

УДК 532.528:532.517.4

© 1996 г. В.П. КАРЛИКОВ, О.В. МОЛОДЫХ, Г.И. ШОЛОМОВИЧ

О ТУРБУЛЕНТНОМ ОТРЫВНОМ ОБТЕКАНИИ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ С ДОННЫМ СРЕЗОМ

Представлены результаты экспериментального исследования в гидродинамической трубе серии моделей тел вращения с донным срезом и сужающимися хвостовыми частями. Показана возможность образования за счет изменения формы и степени сужения хвостовых частей тел придонных областей потока с существенно повышенным давлением и снижения вследствие этого полного сопротивления. Этот эффект связан с наличием интенсивных возвратных струй, возникающих при соударении частиц обтекающего тело потока, движущихся по направлению к оси симметрии.

На основе метода вязко-невязкого взаимодействия проведены расчеты турбулентного обтекания таких тел. Полученные расчетные зависимости для коэффициентов донного давления и сопротивления удовлетворительно согласуются с данными экспериментов.

В различных областях прикладной аэрогидродинамики сохраняет актуальность задача определения донного давления и связанного с ним сопротивления тел вращения с донным срезом.

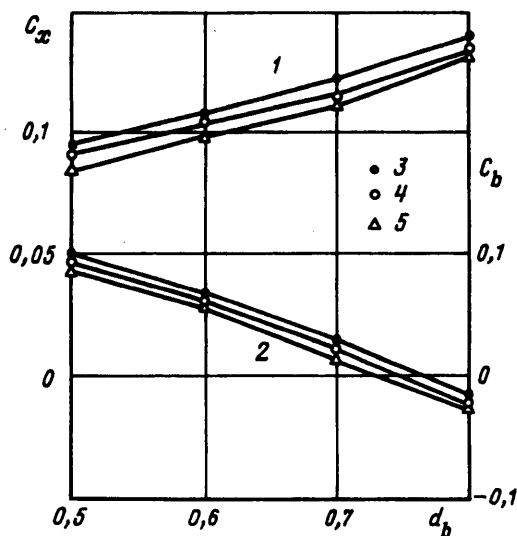
По сравнению с интенсивно развивающимися исследованиями обтекания тел со сверхзвуковыми скоростями течения несжимаемой жидкости и дозвуковым течениям в рассматриваемом классе задач посвящено относительно небольшое число работ. Для оценки среднего донного давления p_b обычно используется представление об эжекционном механизме возникновения донного разрежения [1]. При этом для коэффициента донного давления C_b предлагается эмпирическая зависимость

$$C_b = \frac{2(p_b - p_0)}{\rho_0 V_0^2} = - \frac{0,029}{\sqrt{C_t S_a / S_b}} \quad (0.1)$$

Здесь C_t – коэффициент сопротивления трения, отнесенный к площади боковой поверхности обтекаемого тела S_a , S_b – площадь донного среза тела, ρ_0 и V_0 – плотность и скорость жидкости в натекающем потоке.

Зависимость (0.1) использовалась для оценки величины донного давления при обтекании тел вращения дозвуковым потоком во многих работах, например [2–4]; считалось, что в донной области за телом независимо от формы хвостовой части и степени ее сужения всегда реализуется разрежение ($C_b < 0$). В то же время имеется ряд работ, содержащих экспериментальные данные, из которых следует, что во многих случаях C_b зависит не столько от коэффициента сопротивления трения тела (или параметров пограничного слоя перед донным срезом), сколько от формы тела, в особенности его хвостовой части [5–8].

Для определения возможных диапазонов значений параметров, характеризующих условия опытов и геометрию исследуемых тел, в которых может применяться формула (0.1), в Институте механики МГУ были проведены экспериментальные и расчетные исследования турбулентного отрывного обтекания потоком воды тел вращения с донным срезом и сужающимися хвостовыми частями.



Фиг. 1. Экспериментальные зависимости $C_x(d_b, Re)$ и $C_b(d_b, Re)$ для модели с $L = 5,7$, $\alpha = 17^\circ$, $Re = (1,3-3,4) \cdot 10^6$

1. Объектом экспериментальных исследований служили модели с полусферической носовой, цилиндрической центральной и сменными оживальными хвостовыми частями. Диаметр моделей $D_m = 45$ мм, удлинение $L = L_m/D_m = 5,7$.

В процессе исследования устанавливались зависимости коэффициента донного давления C_b и коэффициента сопротивления $C_x = 8X / \pi D_m^2 \rho_0 V_0^2$ от числа Рейнольдса $Re = V_0 L_m / \nu$ и геометрических параметров хвостовой части модели, определяющих степень хвостового сужения – относительного диаметра донного среза $d_b = D_b/D_m$ и угла α наклона образующей у донной кромки.

Опыты проводились в осесимметричной рабочей части гидродинамической трубы ИМ МГУ при скоростях натекающего потока $V_0 = 6-15$ м/с. Измерение перепада давлений $(p_b - p_0)$ производилось с помощью дифференциального манометра, силы сопротивления X – с помощью рычажных гидродинамических весов, параметров потока V_0 и p_0 – стандартными для гидродинамической трубы средствами. В значения коэффициентов C_x и C_b вносились поправки, учитывающие влияние стенок трубы. Относительные погрешности определения коэффициентов составляют 3–5% для C_x и 1–3% для C_b . Подробно методика эксперимента описана в [9].

Значения определяющих параметров в опытах варьировались в диапазонах: $Re = (1,3-3,4) \cdot 10^6$; $d_b = 0,5-0,8$ (при $\alpha = 17^\circ$) и $\alpha = 12^\circ-21^\circ$ (при $d_b = 0,7$).

На фиг. 1 представлены результаты опытов с моделями, имеющими угол $\alpha = 17^\circ$. Экспериментальные точки, обозначенные 3, 4, 5, соответствуют значениям числа $Re = 1,3 \cdot 10^6$; $2,2 \cdot 10^6$; $3,4 \cdot 10^6$. По этим точкам построены зависимости $C_x = (Re, d_b)$ (кривые 1) и $C_b = (Re, d_b)$ (кривые 2). В исследованном диапазоне чисел Re его влияние на величины C_b и C_x невелико; по графикам можно проследить лишь тенденцию к некоторому уменьшению C_b и C_x с ростом величины числа Re .

Значительно большее влияние оказывает на величины C_b и C_x геометрия хвостовой части тела. Область разрежения $C_b < 0$ формируется за донным срезом только при небольшом сужении хвостовой части $d_b \geq 0,8$, а при $d_b \leq 0,8$ здесь наблюдается зона повышенного давления $C_b > 0$ (фиг. 1). Это приводит к заметному понижению коэффи-

циента сопротивления тела C_x в основном за счет уменьшения коэффициента донного сопротивления, определяемого как $C_d = -C_b d_b^2$. Та же тенденция обнаружена в опытах на моделях с фиксированным диаметром кормового среза d_b , где увеличение степени сужения хвостовой части обеспечивалось лишь увеличением угла α наклона обрабатываемой у донного среза.

На основании экспериментальных данных настоящей работы можно считать доказанным, что следующий из формулы (0.1) вывод о том, что в донной области всегда реализуется разрежение, в действительности подтверждается только для тел с малым хвостовым сужением.

2. В большинстве теоретических исследований донного давления в несжимаемой жидкости и в дозвуковых потоках газа рассматривались плоские течения за уступом или клином; обзоры этих работ можно найти в [2, 10]. Представляет интерес построение достаточно полной расчетной модели для определения величины донного давления за осесимметричным телом с учетом его формы, особенно в связи с практической важностью указанных выше экспериментальных фактов.

В настоящей работе используется расчетная модель, основанная на теории вязко-невязкого взаимодействия, которая включает совместный расчет внешнего невязкого потока вокруг полубесконечного "тела вытеснения" и внутреннего турбулентного потока в следе за телом. Эта модель была применена в [10], в частности, для определения донного давления за плоским уступом в несжимаемой жидкости, а в [11–14] распространена на случаи осесимметричных течений.

Расчетная схема турбулентного отрывного обтекания осесимметричного тела (конуса) в общем случае течения с переменной плотностью в следе (что связано с возможностью возникновения кавитации) рассмотрена в [11]. Там же приводятся исходные уравнения для осесимметричного следа, условия сшивки решений для характерных областей; в [12] подробно описана итерационная процедура построения полного решения. В настоящей работе рассматривается обтекание тел, имеющих значительную протяженность поверхности, в связи с чем схема дополнена расчетами трения [14].

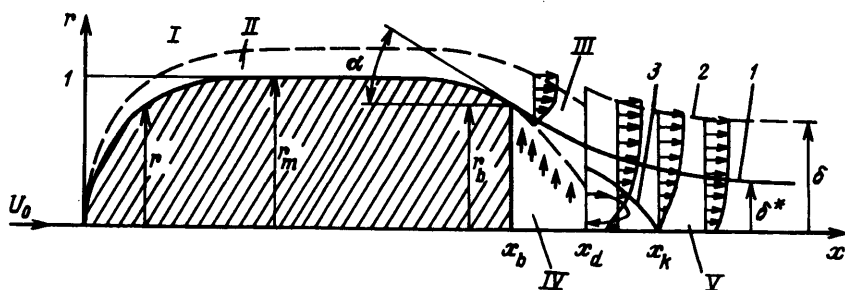
Схематизированная картина обтекания потоком жидкости тела вращения $r(x)$ с сужающейся хвостовой частью и донным срезом r_b показана на фиг. 2.

Принималось, что относительные скорость натекающего потока и максимальный радиус тела равны $U_0 = 1$ и $r_m = 1$. Предполагалось, что отрыв происходит на задней кромке тела; вплоть до задней кромки рассматривалось безотрывное обтекание поверхности. Обоснованием принятой безотрывной схемы могут служить приведенные в [15] оценки диапазона углов сужения кормовых частей, при которых происходит отрыв потока.

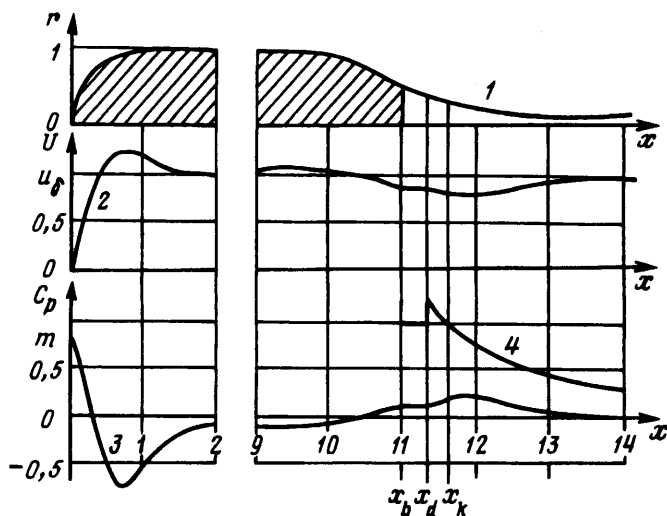
Все поле течения разбивалось на ряд областей.

Внешний потенциальный поток (область I) развивается вокруг тела, образованного контуром обтекаемого тела $r(x)$ и границей толщины вытеснения $\delta^*(x)$ в следе. Влияние присоединенного пограничного слоя II на форму и размеры тела вытеснения здесь не учитывалось. Граница тела вытеснения показана линией 1, граница влияния вязкости – штриховой линией 2. Турбулентное течение за обтекаемым телом разделяется на изобарическую донную область IV и ближний след V. Разделяющая линия 3 отделяет жидкость, уходящую вниз по потоку, от жидкости, циркулирующей в донной области длиной x_d . Критическая точка x_k , находящаяся в зоне соударения осесимметричных струй жидкости, стекающих с тела, ограничивает область возвратных течений. Донная область и внешний поток разделены свободным турбулентным слоем смешения (область III).

Задача расчета сводилась к построению решений для каждой из указанных областей течения и их сшивке при учете соответствующих граничных условий в общем итерационном процессе.



Фиг. 2. Схематизированная картина обтекания



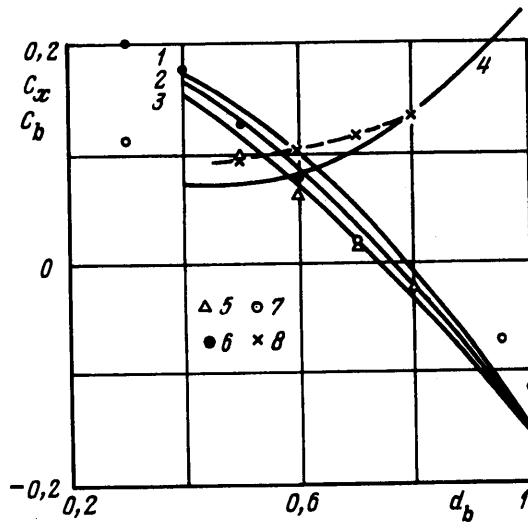
Фиг. 3. Результаты расчета $r(x)$, $U(x)$, $u_\delta(x)$, $C_p(x)$, $m(x)$ для модели с $L = 5,7$, $d_b = 0,5$, $\alpha = 17^\circ$, $Re = 2 \cdot 10^6$

На фиг. 3 в качестве примера показаны результаты расчета обтекания потоком несжимаемой жидкости при $Re = 2 \cdot 10^6$ тела вращения с удлинением $L = 5,5$, оживальной хвостовой частью с диаметром $d_b = 0,5$, $\alpha = 17^\circ$. Значения эмпирических констант брались из работ [10, 11]. Контур тела вытеснения разбивался на $N = 60-100$ элементов; степень аппроксимирующего полинома принималась равной 4.

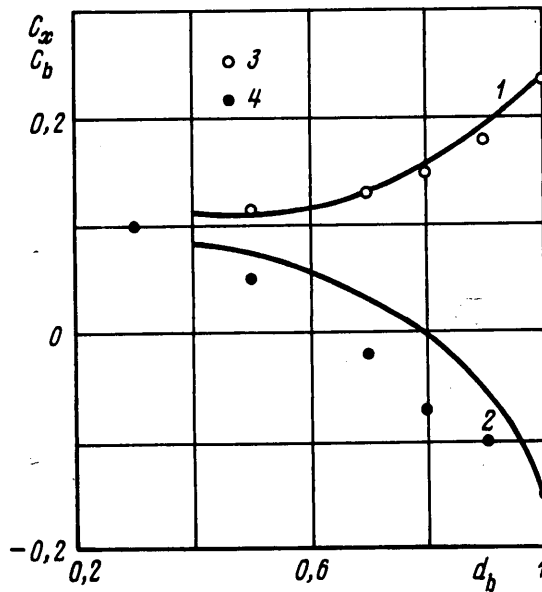
Кривые на фиг. 3 представляют собой расчетную форму границы тела вытеснения (1), распределение скоростей невязкого $U(x)$ и вязкого $u_\delta(x)$ потоков вдоль этой границы (2), $C_p(x)$ (3), распределение формпараметра профиля скорости в следе $m(x)$ (4). Соответствующие значения $C_b = 0,013$; $C_x = 0,079$.

На фиг. 4 построены расчетные зависимости $C_b(x)$ для тел вращения, имеющих удлинения $L = 8; 5,5; 2,5$ (кривые 1-3) с оживальными хвостовыми частями; $\alpha = 17^\circ$ (при $d_b = 0,5-0,8$) и $\alpha = 0^\circ$ (при $d_b = 1$). Здесь же приведены экспериментальные значения C_b по опытам ИМ МГУ (точки 5) и из работ [7, 8], где исследовалось дозвуковое обтекание тел вращения с оживальными хвостовыми частями и донным срезом (точки 6 и 7 соответственно). Кроме того, на фиг. 4 дается расчетная зависимость коэффициента сопротивления $C_x(d_b)$ (кривая 4) и результаты измерений C_x модели с $L = 5,7$, $\alpha = 17^\circ$, при $Re = 2 \cdot 10^6$ (точки 8).

На фиг. 5 нанесены результаты расчетов C_x и C_b (кривые 1 и 2) для тела вращения $L = 8$ с конической хвостовой частью $\alpha = 12^\circ$ и результаты [5] экспериментального



Фиг. 4. Зависимости $C_b(d_b)$ и $C_x(d_b)$ для тел с оживальными хвостовыми частями



Фиг. 5. Зависимости $C_x(d_b)$ и $C_b(d_b)$ для тел с коническими хвостовыми частями

определения C_x (точки 3) и C_b (точки 4) при обтекании такого тела несжимаемой жидкостью.

Из сравнения фиг. 4 и 5 следует, что на величину донного давления влияют не только относительные размеры, но и форма хвостовой части тела: при одинаковых d_b за оживальными хвостовыми частями реализуется более высокое давление, чем за коническими.

Сопоставление расчетных зависимостей с экспериментальными данными (фиг. 4 и 5) позволяет сделать вывод об их удовлетворительном согласии.

Заключение. Проведены теоретические и экспериментальные исследования турбулентного отрывного обтекания тел вращения с сужающимися хвостовыми частями и донным срезом потоком несжимаемой жидкости.

Установлено, что в исследованном диапазоне чисел $1,3 \cdot 10^6 \leq Re \leq 3,4 \cdot 10^6$ величины коэффициентов донного давления C_b и сопротивления C_x изменяются не более чем на 10%, причем большим значениям Re соответствуют меньшие C_b и C_x .

Заметное влияние на C_b и C_x оказывает форма тела, в частности степень сужения хвостовой части. Экспериментально показана и теоретически подтверждена возможность образования за телом донной области с повышенным давлением $C_b > 0$ и существенного снижения коэффициента сопротивления C_x при значительных степенях сужения хвостовой части (так, при $d_b = 0,5$ значение C_x на 30–40% меньше, чем при $d_b = 0,8$). Следующий из известной формулы вывод о том, что в донной области при любой форме тела реализуется разрежение, справедлив лишь для тел с малым хвостовым сужением.

Авторы благодарны Л.В. Гогишу и Г.Ю. Степанову, схематизация течения и расчетные методы которых использованы при выполнении настоящей работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 95-01-00056).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hoerner S.F. Bade drag and thick trailing edges // J. Aeronaut. Sci. 1950. V. 17. № 10. С. 622–628.
2. Чжен П. Отрывные течения. Т. 3. М.: Мир, 1973. 333 с.
3. Грейнер Л. Гидродинамика и энергетика подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1978. 384 с.
4. Горлин С.М. Экспериментальная аэромеханика. М.: Высш. шк., 1970. 423 с.
5. Lang T.G., Patrick H.V. Water-tunnel tests of base-vented torpedo models // Publ. ASME. 1964. № 64-WA/UNT-5. 9 p.
6. Лаврухин Г.Н. Внешнее сопротивление и донное давление хвостовых частей фюзеляжей различной формы // Уч. зап. ЦАГИ. 1975. Т. 6. № 3. С. 105–111.
7. Kadry M. Computational method of the drag of axisymmetric afterbodies in subsonic flow // AJAA Paper. 1983. № 2079. 9 p.
8. Kurn A.G. Drag measurements on a series of afterbodies at transonic speeds showing the effect of sting interference // Aeronaut. Res. Council. Current Papers. London. 1968. № 984. 45 p.
9. Ильшев В.С., Карликов В.П., Шоломович Г.И. Вопросы методики гидродинамического эксперимента // Отчет Ин-та механ. МГУ. 1985. № 3049. 73 с.
10. Гогиш Л.В., Степанов Г.Ю. Турбулентные отрывные течения. М.: Наука, 1979. 367 с.
11. Гогиш Л.В., Молодых О.В. Расчетная модель турбулентного отрывного обтекания конуса с учетом возникновения кавитации // Гидродинамика больших скоростей: Тр. 3-й Всесозн. школы-семинара по гидродинамике больших скоростей, Красноярск: Красноярск. политехн. ин-т, 1987. С. 153–158.
12. Гогиш Л.В., Степанов Г.Ю. Отрывные и кавитационные течения. М.: Наука, 1990. 382 с.
13. Гогиш Л.В., Молодых О.В. Квазигомогенная модель кавитационных течений в диффузорных каналах // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 5. С. 47–54.
14. Гогиш Л.В., Карликов В.П., Молодых О.В. и др. Исследование донного давления тел вращения в потоке несжимаемой жидкости // Отчет Ин-та механ. МГУ. 1987. № 3525. 50 с.
15. Лаврухин Г.Н., Лаврентьева А.В. Исследования течений за донным срезом тел, обтекаемых потоком газа // Обзор БНТИ ЦАГИ. 1974. № 452. 157 с.

Москва

Поступила в редакцию
24.X.1995