

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ С РЕАКТИВНОЙ СТРУЕЙ

Е. И. МОСПАНОВ, О. В. ЯКОВЛЕВСКИЙ

(Москва)

Известно, что затопленная турбулентная струя индуцирует движение окружающей жидкости к своим границам. Течения жидкости, обусловленные распротранением турбулентной струи в неподвижной среде при различных положениях внешних границ среды, исследованы теоретически и экспериментально в работах [1-4].

Однако связанное с эжекцией влияние струи на обтекание тел, расположенных за пределами струи, изучено недостаточно. Например, дополнительные аэродинамические силы, вызванные турбулентной струей, истекающей из задней кромки плоского профиля, исследованы лишь в [5, 8]. В опубликованной литературе совершенно отсутствуют экспериментальные данные об обтекании тела вращения с учетом эжектирующего действия осесимметричной реактивной струи, выдуваемой из его кормовой части.

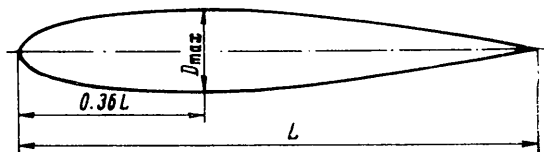
В ряде работ теоретическое решение задачи о внешнем потенциальном течении получается по известному из расчета струи распределению поперечной составляющей скорости на границе струи. Задача решается приближенно, поскольку учитывается лишь влияние струи на обтекание тела, а влияние тела на струю пренебрегают. Струю считают изобарической, сложный начальный профиль скоростей внешнего потока упрощают и не учитывают пограничный слой, образующийся на теле. Решение дается только для струи в спутном потоке, когда эжекция на обеих границах струи одинакова.

В некоторых случаях струя математически моделируется линией непрерывно распределенных стоков переменной интенсивности, что приводит к необходимости расчета потенциального обтекания потоком идеальной несжимаемой жидкости тела при наличии в потоке стоков [5]. Теория достаточно удовлетворительно подтверждается экспериментами и, по-видимому, применима при относительно больших значениях коэффициента импульса струи C_I , значительно превышающих значение коэффициента профильного сопротивления тела C_x .

В настоящей работе приведены некоторые результаты экспериментального исследования профильного сопротивления безотрывно обтекаемого тела вращения с учетом эжектирующего действия турбулентной струи, выдуваемой в аэродинамический след при $C_I \geq C_x$, иными словами, в таком диапазоне значений C_I , которому соответствуют турбулентные спутные течения с отрицательным ($C_I < C_x$), пилевым ($C_I = C_x$), а также со сравнительно небольшим положительным ($C_I > C_x$) значением избыточного импульса. В известной литературе данные для этих условий отсутствуют.

Показано весьма значительное и различное по знаку влияние струи на обтекание тела несжимаемой жидкостью при изменении коэффициента импульса струи в широком диапазоне. Определена роль избыточного импульса струи, отношения скоростей, плотностей, а также относительной толщины пограничного слоя на теле в формировании «эжектионного» воздействия струи на обтекание тела.

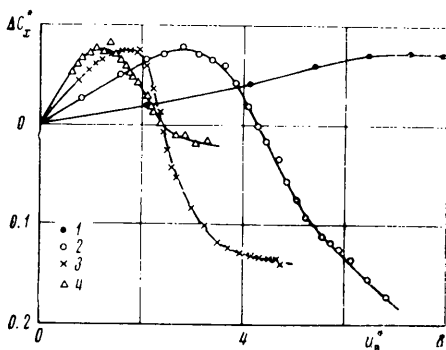
1. Экспериментальные исследования выполнены на модели тела вращения удобообтекаемой формы с максимальным диаметром $D_{\max} = 180$ мм, расположенным на расстоянии, равном 36% длины тела L от носовой точки, с удлинением $\lambda = L/D_{\max} = 5.84$ (фиг. 1). Воздух или гелий (с относительной плотностью $\rho_0^* = \rho_0/\rho_\infty = 0.138$) выду-



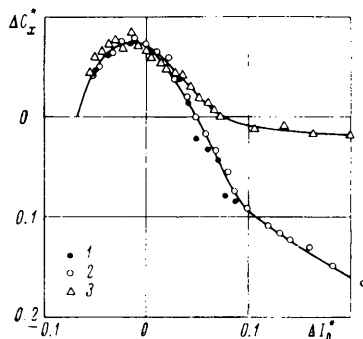
Фиг. 1

вался из конического осесимметричного сопла с безразмерным радиусом на срезе $r_0^* = 2r_0/D_{\max}$, значения которого составляли 0.0556, 0.0833 и 0.1110, и толщиной кромки 0.2 мм (тело закруглялось). Степень поджатия сопел (по площади) составляла 5 ± 5.5 . Режим истечения газа из сопла устанавливался по величине его секундного расхода. Скорость истечения газа из сопла изменялась в случае воздушной струи в диапазоне $0 \leq u_0 \leq 250$ м/сек, а в случае струи гелия — $0 \leq u_0 \leq 420$ м/сек.

Эксперименты проводились на двухкомпонентных весах в аэродинамической трубе незамкнутого типа с рабочей частью диаметром 1500 мм при скорости потока $u_\infty = 30$ м/сек, нулевом угле атаки модели, числе Рейнольдса $R = 2.16 \cdot 10^6$ (определенном по длине тела вращения) и интенсивности турбулентности потока в аэродинами-



Фиг. 2



Фиг. 3

ческой трубе 1.5%. Изменение числа R при закруглении тела не учитывалось (срезанная часть по длине составляла не более 0.03 L).

Импульс реактивной струи I измерялся на аэродинамических весах при истечении в неподвижную окружающую среду. Для учета возможного изменения импульса струи при ее истечении в движущуюся окружающую жидкость были проведены измерения газодинамических параметров на срезе сопла при значениях u_∞ , равных 0 и 30 м/сек (расход газа через сопло поддерживался постоянным), и вычисления по формуле $I = m_{i0} + (p_0 - p_\infty)F_0$, где m_{i0} — количество движения струи, p_0 — статическое давление в струе на срезе сопла, p_∞ — статическое давление в набегающем потоке, F_0 — площадь среза сопла. Оказалось, что в условиях настоящих опытов величина импульса струи при ее истечении в движущуюся окружающую жидкость практически не изменялась по сравнению со случаем истечения в неподвижную среду.

Среднее значение безразмерной скорости истечения струи $u_0^* = u_0/u_\infty$ определялось по величине коэффициента импульса струи $C_I = I/q_\infty S_{\max} = 2\rho_0^*(r_0^*)^2(u_0^*)^2$, где q_∞ — скоростной напор набегающего потока, $S_{\max}$ — площадь наибольшего поперечного сечения тела вращения.

2. В опытах осуществлялось измерение сопротивления системы тело — струя на каждом режиме истечения газа из сопла. Знание величины импульса струи позволяло определять профильное сопротивление C_x тела при наличии струи. Полученная величина сравнивалась со значением профильного сопротивления тела без струи (с незатупленной кормовой частью) C_{x0} , откуда определялась величина изменения профильного сопротивления $\Delta C_x = C_x - C_{x0}$.

Зависимость изменения профильного сопротивления тела вращения $\Delta C_x^* = \Delta C_x/C_{x0}$, отнесенного к сопротивлению тела без струи, от величины относительной скорости истечения u_0^* струи воздуха ($\rho_0^* = 1.0$) для трех значений $r_0^* = 0.0556$ (точки 2), 0.0833 (точки 3), 0.1110 (точки 4) представлена на фиг. 2. Здесь же приведены результаты опытов с гелиевой струей ($\rho_0^* = 0.138$) для случая $r_0^* = 0.0556$ (точки 1).

Как видно, с возрастанием относительной скорости истечения струи профильное сопротивление тела уменьшается, затем растет, оставаясь при этом в некотором диапазоне значений u_0^* меньше исходной величины. Значение относительной скорости истечения u_{0k}^* , при котором наблюдается

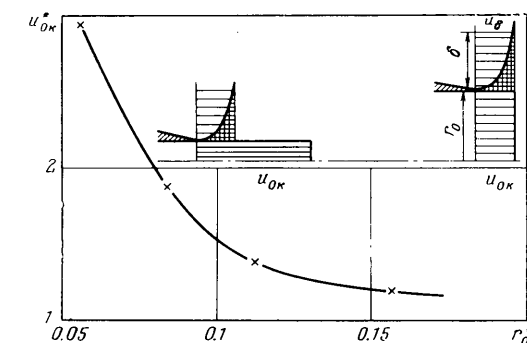
наибольший эффект снижения профильного сопротивления, зависит от относительной плотности вещества струи ρ_0^* и радиуса сопла r_0^* . Очевидно, что существует такой режим течения, который при заданных r_0^* и ρ_0^* определяет величину $u_0^* = u_{0k}^*$.

Сопоставление значения коэффициента импульса струи C_{Ih} , соответствующего условию $u_0^* = u_{0k}^*$, с коэффициентом профильного сопротивления тела на этом режиме течения показало, что при этом $C_I \approx C_x$. Это означает,

что максимальный эффект снижения сопротивления получается при нулевом избыточном импульсе струйного течения

$$\Delta I = \pi \int_0^\infty \rho u (u - u_\delta) dy^2 = 0$$

где u_δ — скорость спутного потока. Для иллюстрации этого положения на фиг. 3 показана зависимость изменения коэффициента профильного сопротивления тела вращения от безразмерной величины избыточного импульса в плоскости среза сопла



Фиг. 4

ла $\Delta I_0^* = \Delta I_0 / q_\infty S_{\max}$ (точки 1 и 2 соответствуют струям гелия и воздуха, вытекающим из сопла с радиусом $r_0^* = 0.0556$, а точки 3 — воздушной струе, вытекающей из сопла с радиусом $r_0^* = 0.1110$). На этом графике величина $\Delta I_0^* = -0.0665$ представляет собой импульс (в безразмерном виде), потерянный в следе за телом без струи.

Из фиг. 2, 3 следует, что при заданных r_0^* и ρ_0^* наибольший эффект снижения сопротивления получается при таком отношении u_0/u_∞ , которое соответствует условию $\Delta I_0^* \approx 0$. Этот результат объясняет влияние на значение u_{0k}^* как диаметра среза сопла (относительной толщины пограничного слоя на теле δ/r_0 перед смещением), так и плотности вещества струи.

Роль параметра δ/r_0 косвенно иллюстрируется на фиг. 4 зависимостью u_{0k}^* от безразмерной величины радиуса среза сопла r_0^* . Видно, что значение u_{0k}^* с ростом r_0^* стремится к единице, т. е. перестает зависеть от диаметра сопла. Полученный результат объясняется изменением начальных внешних условий перед смещением. С ростом r_0^* (уменьшением относительной толщины пограничного слоя δ/r_0 на теле) уменьшается вклад исходного пограничного слоя в избыточный импульс. Условие обращения в нуль избыточного импульса струйного течения выполняется в случае пренебрежимо малой относительной толщины пограничного слоя при $u_0 = u_\delta$, где u_δ — скорость на внешней границе пограничного слоя в плоскости среза сопла. При безотрывном обтекании тела $u_\delta \approx u_\infty$, поэтому $\Delta I_0^* \approx 0$ при $u_0 \approx u_\infty$, т. е. при $u_0^* \approx 1.0$.

Если относительная толщина пограничного слоя на теле не изменяется ($\delta/r_0 = \text{const}$), то при уменьшении плотности струи ($\rho_0/\rho_\infty < 1.0$) для выполнения условия $\Delta I_0^* = 0$ требуется увеличение отношения u_0/u_∞ .

Таким образом, чем больше относительная толщина пограничного слоя на теле δ/r_0 перед смещением и меньше относительная плотность струи ρ_0/ρ_∞ , тем больше по сравнению с единицей величина u_{0k}^* .

3. Результаты экспериментальных исследований показывают весьма существенное влияние возмущающего воздействия турбулентной струи на профильное сопротивление безотрывно обтекаемого тела. Для понимания физической сущности полученных эффектов, связанных с одним из основ-

ных свойств турбулентной струи — с эжекцией вещества из окружающей среды — необходимо рассмотреть механизм процесса образования профильного сопротивления тел.

Современное понимание сущности профильного сопротивления связано с гипотезой прилипания частиц вязкой жидкости к обтекаемой поверхности. Гипотеза позволяет понять физическую сущность профильного сопротивления как сочетания прямых и косвенных действий прилипания частиц. Прямое действие прилипания состоит в появлении градиента скорости в направлении нормали к поверхности тела, а следовательно, в появлении касательных напряжений, которые, будучи проинтегрированы по поверхности, дают сопротивление трения. Косвенное действие заключается в том, что пограничный слой препятствует смыканию потока позади обтекаемого тела («эффективное тело» толще). Благодаря этому изменению картины течения (контур тела не является нулевой линией тока) появляется сопротивление давления (формы).

В работе [7] приводится сравнение экспериментальной и теоретической эпюр давления для тела вращения, изображенного на фиг. 1. Из этих данных следует, что распределение давления на поверхности удобообтекаемого тела удовлетворительно совпадает с теоретическим распределением. Исключение составляет область вблизи кормовой части тела, где наблюдается весьма существенное различие между теорией и экспериментом. Аналогичный результат получается и для плоского удобообтекаемого профиля. Это значит, что профильное сопротивление даже безотрывно обтекаемых тел больше сопротивления трения. Так, доля сопротивления давления удобообтекаемого тела вращения небольшого удлинения ($\lambda=3$) может достигать 30% профильного сопротивления, а у профиля Жуковского с небольшой относительной толщиной ($10 \div 15\%$) при $\alpha=0 \div 6^\circ$ доля сопротивления давления составляет $25 \div 30\%$. Следует заметить, что при возрастании числа R и полностью турбулентном течении в пограничном слое абсолютные величины как сопротивления трения, так и сопротивления давления уменьшаются. Однако доля сопротивления трения и сопротивления давления в общем балансе практически постоянна. Таким образом, обратное влияние пограничного слоя на внешний поток при безотрывном обтекании оказывается особенно существенным вблизи кормовой части тела, где толщина слоя наибольшая, и может приводить к существенному увеличению профильного сопротивления.

Можно заключить, что под влиянием различных внешних воздействий возможно такое изменение характера обтекания тела, которое приводит к снижению профильного сопротивления благодаря влиянию на структуру пограничного слоя в кормовой части тела.

4. Рассмотренная схема образования профильного сопротивления, а также результаты настоящих экспериментальных исследований позволяют предложить следующую физическую картину обтекания тела со струей.

Турбулентная струя эжктирует частицы окружающей среды и возбуждает движение жидкости по направлению к границам струи. В зависимости от величины избыточного импульса ΔI_0 реализуются два случая взаимодействия струи и спутного потока.

В случае $\Delta I_0 \leq 0$ струя распространяется внутри соосного следа относительно большей турбулентности, имеющего свободные внешние границы. Турбулентный обмен в этом случае интенсифицирован благодаря начальной неравномерности и большой интенсивности турбулентности спутного потока (следа за телом). Кроме того, смещение происходит в поле давления, формирующемся при обтекании тела. Эжекция вещества из окружающей среды и связанное с ней течение жидкости (вне турбулент-

ной области струи) приводят к изменению структуры турбулентного пограничного слоя на теле вблизи его кормовой части. Линии тока потенциального течения располагаются ближе к контуру тела («эффективное тело» тоньше), и сопротивление давления уменьшается. При выдуве струи в этих условиях выигрыш, по-видимому, не может быть больше доли сопротивления давления в профильном сопротивлении. Вследствие относительно большой турбулентности слутного потока (следа) изменение диаметра сопла при $\Delta I_0 = \text{const}$ (изменение поперечного градиента скорости) не оказывает заметного влияния на эффект уменьшения сопротивления, который определяется только величиной избыточного импульса струи (фиг. 3).

В случае $\Delta I_0 > 0$ картина обтекания тела определяется возмущающим воздействием турбулентной струи на потенциальное течение. Эжекция в струю приводит к искривлению линий тока потенциального течения, благодаря чему давление в кормовой части тела уменьшается. Этот процесс приводит к снижению выигрыша, а при $\Delta I_0 \gg 0$ — даже к увеличению профильного сопротивления. При этом размывание струи зависит и от струйной турбулентности, интенсивность которой связана с величиной градиента скорости (струя в потоке относительно малой турбулентности). Поэтому уменьшение диаметра среза сопла при $\Delta I_0 = \text{const}$ приводит к большему росту сопротивления в соответствии с ростом поперечного градиента скорости.

В проведенных опытах не обнаружено заметного влияния изменения относительной плотности струи при том же значении избыточного импульса на возмущающее воздействие струи (фиг. 3).

Поступила 24 VI 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Павловский В. В. Течения, вызываемые турбулентными струями вне турбулентной области. Тр. Ленингр. политехн. ин-та, 1958, № 198.
2. Яковлевский О. В., Секундов А. Н. Течения жидкости, индуцированные турбулентными струями. Изв. АН СССР, Механика и машиностроение, 1964, № 3.
3. Яковлевский О. В., Секундов А. Н. Исследование взаимодействия струи с близко расположенными экранами. Изв. АН СССР, МЖГ, 1964, № 1.
4. Гиневский А. С. Теория турбулентных струй и следов. М., «Машиностроение», 1969.
5. Wygnanski J. The effect of jet entrainment on loss of thrust for a two-dimensional symmetrical jet-flap aerofoil. Aeronaut. Quarterly, 1966, vol. 17, pt 1.
6. Dimmock N. A. An experimental introduction to the jet flap. Aero. Res. Council. London, Curr. Paper, 1956, No. 344.
7. Прандтль Л., Титъенс О. Гидро- и аэромеханика, т. 2. М.—Л., Гостехиздат, 1935.
8. Dimmock N. A. Some further jet flap experiments. Aero. Res. Council. London, Curr. Paper, 1957, No. 345.