

УДК 532.526

**ВЛИЯНИЕ ВВЕДЕНИЯ В ПОТОК МАЛЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
ДОБАВОК НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПЛОСКИХ ПРОФИЛЕЙ**

ДРОБЛЕНКОВ В. В., КАНЕВСКИЙ Г. И.

Рассматривается задача о безотрывном обтекании плоских профилей однородными слабыми растворами полимеров. Для ее решения весь поток разделяется внешней границей пограничного слоя и следа на две области: зону потенциального течения и зону течения вязкой жидкости — пограничного слоя и следа, характеристики которых непрерывно стыкуются на их границе.

После разделения потока на две части задача решается методом последовательных приближений с учетом взаимного воздействия выделенных областей друг на друга. Учет влияния потенциальной зоны потока на вязкую осуществляется через распределение давлений на границе пограничного слоя и следа. Влияние вязкой части течения учитывается посредством введения присоединенного вихря, интенсивность которого равна интегралу от завихренности во всей вязкой области, а также путем введения дополнительных скоростей на границе пограничного слоя и следа, деформирующих линии тока в потенциальной части потока и приводящих их в соответствие с картиной течения в реальной жидкости.

Результаты расчетов гидродинамических характеристик профиля Н. Е. Жуковского сопоставляются с экспериментальными данными. Анализ влияния введения в поток малых полимерных добавок на распределенные и суммарные характеристики течения при ряде чисел Рейнольдса проводится на примере модифицированного профиля NACA66.

1. Параметры пограничного слоя рассчитываются отдельно для верхней и нижней поверхности профиля с использованием метода интегральных соотношений [1], учитывающего ламинарную, переходную и турбулентную зоны течения в слое. Наличие в потоке малых полимерных добавок учитывается с помощью корреляции Мейера для профиля продольной составляющей скорости u в турбулентном пограничном слое [2]

$$(1.1) \quad \frac{u}{v^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y_1 v^*}{\nu} + \frac{\Pi}{\kappa} \left(1 - \cos \frac{\pi y_1}{\delta} \right) + B_0 + \Delta B$$

$$\Delta B = 0, \quad v^* < v_0^*; \quad \Delta B = \beta \ln \frac{v^*}{v_0^*}, \quad v^* \geq v_0^*$$

Здесь y_1 — нормальная к обтекаемой поверхности координата, v^* — динамическая скорость, $\kappa = 0,4$ и $B_0 = 5,2$ — константы турбулентности, Π — параметр Коулса, δ — толщина пограничного слоя, β — параметр, учитывающий свойства растворенного полимера и его концентрацию в растворе, v_0^* — значение динамической скорости, соответствующее началу проявления эффекта Томса.

Характеристики турбулентного следа за профилем определяются с использованием интегрального метода [3] также отдельно для верхней и нижней части следа. За ось следа принимается нулевая линия тока в идеальной жидкости при заданном значении циркуляции скорости вокруг профиля. Распределения продольной составляющей скорости u и кас-

тельных напряжений τ в следе аппроксимируются соотношениями

$$(1.2) \quad \frac{u}{U_0} = 1 - \left(1 - \frac{U_m}{U_0}\right) \left[(1-\gamma) \exp\left(-\frac{k^2 y_1^2}{\delta^2}\right) + \frac{\gamma}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi y_1}{\delta}\right) \right]$$

$$(1.3) \quad \frac{\tau}{\rho U_0^2} = 2\kappa_1 \left(1 - \frac{U_m}{U_0}\right)^2 (1-\gamma) k^2 \frac{y_1}{\delta} \exp\left(-\frac{k^2 y_1^2}{\delta^2}\right)$$

Здесь U_0 — продольная составляющая скорости на внешней границе следа, U_m — скорость на его оси, k и γ — параметры следа, изменяющиеся по его длине, ρ — плотность жидкости, κ_1 — коэффициент турбулентной вязкости, переменный по длине следа.

Полагая, что влияние малых полимерных добавок проявляется только в перестройке турбулентного обмена в непосредственной близости от обтекаемой поверхности и не оказывает непосредственного воздействия на свободную турбулентность, принимается, что все влияние полимерных добавок на характеристики течения в следе учитывается в изменении начальных данных для его расчета. Начальные значения параметров для верхней и нижней части следа определяются из условия непрерывности толщины δ , толщины вытеснения δ^* , толщины потери импульса δ^{**} и максимального значения касательных напряжений при переходе от пограничного слоя к следу.

Для определения положения границы раздела вязкой и невязкой зон течения толщина пограничного слоя (следа) откладывается по нормали к поверхности профиля или оси следа. В непосредственной близости от задней кромки профиля производится сглаживание полученной границы по кубическим параболом.

Характеристики потенциальной части течения рассчитываются с использованием теории конформных отображений. На физической плоскости z располагается профиль заданной формы, а на вспомогательной плоскости ζ — окружность радиуса a . Отображающая функция, связывающая две комплексные плоскости, находится в виде ряда Лорана

$$(1.4) \quad z = \zeta + c_0 + \sum_{n=1}^h c_n a^n \zeta^{-n}$$

Ее коэффициенты рассчитываются по методу [4].

Комплексный потенциал течения разделяется на два слагаемых, первое из которых связано с циркуляционным обтеканием профиля идеальной жидкостью, а второе — с дополнительными скоростями, обеспечивающими необходимое для учета влияния вязкости отгеснение линий тока

$$(1.5) \quad W = W_1 + W_2$$

$$W_1 = \zeta \exp(-i\alpha) + a^2 \zeta^{-1} \exp(i\alpha) + \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln \zeta$$

Здесь α — угол атаки, Γ — циркуляция присоединенного вихря.

В качестве условия для определения расчетного значения циркуляции в вязкой жидкости используется требование равенства потоков завихренности, сходящих с верхней и нижней поверхностью профиля в след, впервые предложенное Тэйлором в 1924 г. [5]. В следе условие равенства потоков завихренности, рассчитанных для его верхней и нижней части, эквивалентно требованию непрерывности давлений на его оси

$$(1.6) \quad I_+ = 2 \int_0^{\delta_+} \omega_1 u dy_1 = I_- = 2 \int_0^{\delta_-} \omega_2 u dy_1; \quad p_{0+} = p_{0-}$$

где I — поток завихренности через сечение следа, ω_z — завихренность в данной точке, p_0 — давление на оси следа, индексы «плюс» и «минус» относятся соответственно к верхней и нижней части следа.

Пренебрегая изменением давления поперек следа, из условий (1.6) для модуля вектора скорости V_0 на внешней границе следа получим $V_{\delta+} = V_{\delta-}$. Это соотношение, примененное к точкам на внешней границе пограничного слоя, соответствующим задней кромке профиля (начальному сечению следа), и служит для определения расчетного значения циркуляции.

Для обеспечения необходимого оттеснения линий тока в потенциальной части течения, приводящего их в соответствие с картиной потока в реальной жидкости, на поверхности профиля и оси следа располагается система источников и стоков, интенсивность которых Q_z определяется в приближении линейной теории из условия $1/2 Q_z = \Delta v_n$, где Δv_n — дополнительные нормальные скорости, возникающие на границе пограничного слоя и следа в вязкой жидкости. Значения Δv_n определяются из условия непрерывности скоростей при переходе через границу вязкой и потенциальной зон течения

$$(1.7) \quad \Delta v_n \approx \frac{d}{dx} [V_{01} \delta^* + (V_{02} - V_{01}) \delta]$$

Здесь x — продольная координата. Индексы 1 и 2 относятся к параметрам, определенным соответственно в вязкой и идеальной жидкости.

В соотношение (1.7) входит заранее неизвестная величина V_{01} и зависящие от нее значения δ и δ^* , поэтому задача по определению дополнительных скоростей, вызванных обратным влиянием вязкой зоны течения на потенциальный поток, решается методом последовательных приближений.

Для определения величины циркуляции присоединенного вихря в вязкой жидкости производится расчет параметров течения при ряде значений Γ , а затем находится циркуляция, при которой выполняется условие $V_{\delta+} = V_{\delta-}$. При найденном значении циркуляции вновь выполняется расчет распределенных гидродинамических характеристик профиля, обтекаемого вязкой жидкостью. При каждом значении циркуляции параметры потока определяются в процессе итераций, включающих в себя расчет характеристик идеальной жидкости, пограничного слоя, следа и их взаимодействия. Для обеспечения сходимости процесса последовательных приближений при расчете скоростей на границе раздела двух зон течения вводится коэффициент релаксации, равный 0,5. Процесс последовательных приближений заканчивается при выполнении условия

$$(1.8) \quad |V_{\delta+}^k - V_{\delta+}^{k-1}| < 0,01; \quad |V_{\delta-}^k - V_{\delta-}^{k-1}| < 0,01$$

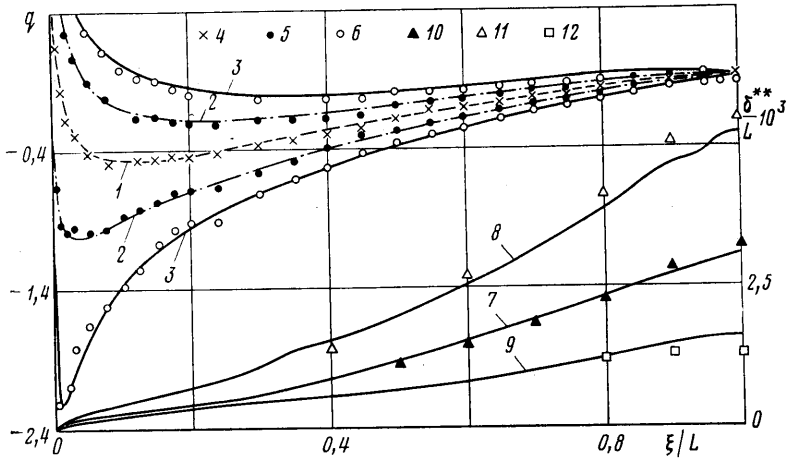
В соотношении (1.8) значения скоростей V_0 определяются для точек, соответствующих задней кромке профиля, а индекс k указывает номер итерации.

После определения расчетной циркуляции и характеристик пограничного слоя и следа коэффициенты подъемной силы C_y , профильного сопротивления C_x и момента C_m находятся по соотношениям [6]

$$C_y = \frac{R_y}{0,5\rho U_0^2 L} = -\frac{2\Gamma}{U_0 L}; \quad C_x = \frac{R_x}{0,5\rho U_0^2 L} = \frac{2\delta_{\infty}^{**}}{L}$$

$$C_m = \frac{M_z}{0,5\rho U_0^2 L^2} = \frac{4\pi a}{U_0 L^2} \left[-\frac{\Gamma}{2\pi a} (c_{0R} \cos \alpha + c_{0i} \sin \alpha) + \right. \\ \left. + c_{1i} \cos 2\alpha - c_{1R} \sin 2\alpha \right]$$

Здесь U_0 — скорость набегающего потока, L — хорда профиля, δ_{∞}^{**} — значение толщины потери импульса на бесконечности за профилем, c_{0R} , c_{0i} , c_{1R} , c_{1i} — вещественные и мнимые части коэффициентов отображающей функции. Момент M_z определяется относительно начала координат, расположенного в носике профиля. Значение δ_{∞}^{**} находится с использованием формулы Сквайра — Юнга [6], примененной к сечению следа, рас-



Фиг. 1

положенному на 60% длины профиля за его задней кромкой

$$\delta_{\infty}^{**} = \delta_{+}^{**} \left(\frac{V_{\delta+}}{U_0} \right)^{0,5(5+H_+)} + \delta_{-}^{**} \left(\frac{V_{\delta-}}{U_0} \right)^{0,5(0+H_-)}$$

где δ_{+}^{**} , δ_{-}^{**} , $V_{\delta+}$, $V_{\delta-}$, $H_+ = \delta_{+}^{**}/\delta_{+}^{**}$, $H_- = \delta_{-}^{**}/\delta_{-}^{**}$ определяются при $\xi/L=1,6$. Координата ξ отсчитывается от носовой оконечности профиля вдоль его хорды и ее продолжения.

Таблица 1

α°	Расчет			Эксперимент [7]	
	C_x	C_y	C_{y_2}	C_x	C_y
0	9,97	0	0	10,0	0
3	10,11	0,3277	0,3598	10,4	0,317
6	11,42	0,6604	0,7184	11,76	0,634

2. По предлагаемому методу была составлена программа на языке АЛГОЛ-60 применительно к ЭВМ БЭСМ-6. В качестве исходных данных для счета по ней задаются: коэффициенты отображающей функции для профиля, хорда профиля (L), угол атаки (α), параметры набегающего потока — его скорость (U_0) и степень турбулентности (ϵ), кинематический коэффициент вязкости (ν) и параметры, определяющие влияние полимерных добавок (ν_0^* и β).

Результаты расчетов гидродинамических характеристик профиля Н. Е. Жуковского с относительной толщиной 11,8% сопоставлены с данными экспериментов [7] на фиг. 1 и в табл. 1.

В таблице и в дальнейшем для всех коэффициентов сопротивления опущен множитель 10^{-3} . В соответствии с условиями эксперимента [7] расчеты были выполнены для степени свободной турбулентности $\epsilon=1,75\%$ и числа Рейнольдса $Re=U_0L/\nu=4,2 \cdot 10^5$. Для сравнения в таблице приведены также значения коэффициента подъемной силы, рассчитанные для обтекания профиля идеальной жидкостью — C_{y2} . На фиг. 1 рассчитанные на внешней границе пограничного слоя распределения коэффициента давления q сопоставлены с результатами измерений давлений на поверхности профиля с помощью дренажных трубок. Кривые 1–3 и экспериментальные точки 4–6 относятся соответственно к углам атаки $\alpha=0, 3, 6^\circ$. На этой же фигуре сравниваются рассчитанные (кривые 7–9) и определенные в ходе экспериментов [7] (точки 10–12) безразмерные значения толщины потери импульса δ^{**}/L . Значения 7, 10 относятся к углу атаки $\alpha=0$; 8, 11 — к $\alpha=6^\circ$ и верхней поверхности профиля, а 9, 12 — к $\alpha=6^\circ$ и нижней его поверхности.

Приведенные результаты свидетельствуют об удовлетворительном согласовании между данными расчетов и опытов как по силовым, так и по распределенным гидродинамическим характеристикам.

Для анализа влияния введения в поток малых полимерных добавок на гидродинамические характеристики плоских профилей были выполнены систематические расчеты для ламинаризованного профиля NASA 66 с относительной толщиной 5 и кривизной 1%.

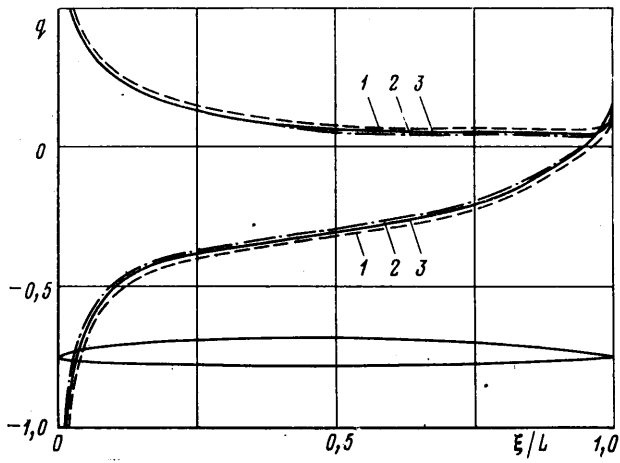
Расчеты выполнялись для чисел Рейнольдса $6 \cdot 10^6$ и $3 \cdot 10^7$ при углах атаки $-3, 0, 1,5$ и 3° . При $Re=6 \cdot 10^6$ принималось, что $L=1$ м и $U_0=9$ м/с, а при $Re=3 \cdot 10^7$ — $L=1,6$ м и $U_0=30$ м/с. Величина v_0^* полагалась равной 0,023 м/с, а значения параметра β принимались равными 0; 2,5; 4,34 и 7,5, что примерно соответствует обтеканию профиля однородным водным раствором полиэтиленоксида WSR-301 с концентрацией 0,5, 10 и 25 ppm. Степень свободной турбулентности во всех расчетах принималась равной 2%.

На фиг. 2, 3 приведено распределение коэффициента давления по профилю в невязкой жидкости (кривые 1) и по внешней границе пограничного слоя в вязкой жидкости при $Re=6 \cdot 10^6$ и $\beta=0$ (кривые 2) и при $Re=6 \cdot 10^6$ и $\beta=4,34$ (кривые 3). Все результаты относятся к обтеканию профиля при $\alpha=3^\circ$.

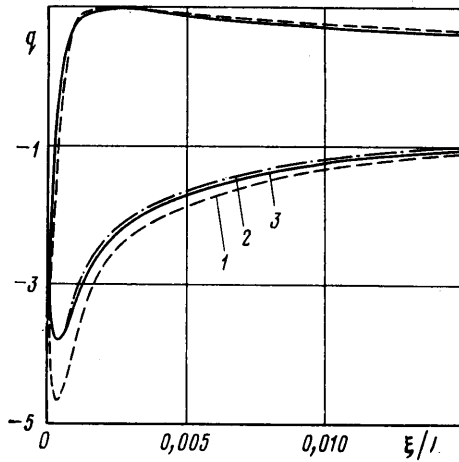
Практически на всей длине профиля, за исключением районов носовой и кормовой оконечностей, наблюдается эквидистантное смещение кривых q , соответствующих обтеканию профиля вязкой жидкостью по сравнению с величинами, рассчитанными в невязкой жидкости. Введение в поток полимерных добавок приближает рассчитанные значения коэффициента давления q к величинам, соответствующим обтеканию профиля невязкой жидкостью. В районе носовой критической точки наблюдается весьма существенное перераспределение давлений вследствие проявления сил вязкости. Следует отметить, что по данным настоящих расчетов введение в поток малых полимерных добавок не приводит к заметному изменению величины пика разрежения вблизи носовой оконечности профиля. В непосредственной близости от задней кромки профиля величина q изменяется от 1 в невязкой жидкости до значений 0,12–0,14 в вязкой.

На фиг. 4 представлены распределения толщины потери импульса в пограничном слое и следе за профилем NASA 66. Результаты получены при $Re=6 \cdot 10^6$ и $\alpha=3^\circ$. Кривые 1, 2 соответствуют значениям δ^{**}/L , полученным для верхней и нижней поверхностей профиля при $\beta=0$, а кривые 3, 4 — значениям δ^{**}/L для верхней и нижней поверхностей при $\beta=4,34$. Влияние полимерных добавок приводит к существенному уменьшению толщины потери импульса δ^{**} в области турбулентного пограничного слоя и следа.

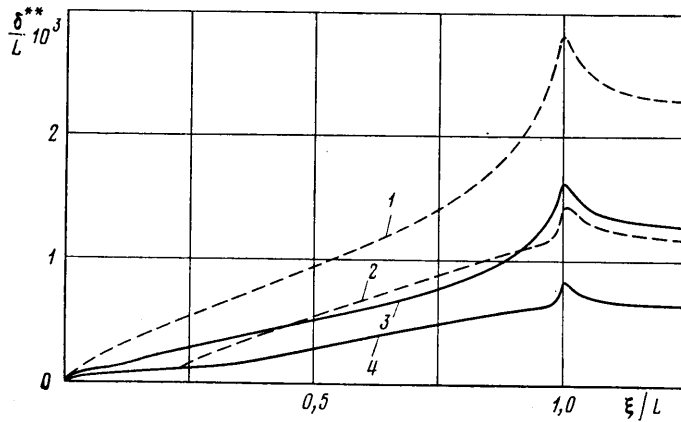
Результаты расчетов C_x , C_y и C_m профиля NASA 66 приведены в табл. 2. Значения коэффициентов подъемной силы и момента, определенные для этого профиля в невязкой жидкости при $\alpha=-3, 0, 1,5, 3^\circ$, составляют соответственно: $C_{y2}=-0,2416; 0,1312; 0,3026; 0,4737$ и $C_{m2}=-0,0246; 0,0645; 0,1099; 0,1533$. Приведенные данные показывают, что зависимость C_y от



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

угла атаки в вязкой жидкости сохраняет линейный характер. Увеличение числа Рейнольдса или введение в поток малых полимерных добавок изменяет значения C_y и C_m в сторону их приближения к соответствующим величинам, определенным в невязкой жидкости. Коэффициент профильного сопротивления C_x уменьшается с ростом числа Рейнольдса и резко падает при введении в поток полимерных добавок. С ростом концентрации

Таблица 2

β	$\alpha=-3^\circ$			$\alpha=0^\circ$			$\alpha=1,5^\circ$			$\alpha=3^\circ$		
	C_y	C_x	C_m	C_y	C_x	C_m	C_y	C_x	C_m	C_y	C_x	C_m
$Re=6 \cdot 10^4$												
0	-0,1918	6,355	-0,0147	0,1176	6,568	0,0577	0,2724	6,632	0,0940	0,4278	6,697	0,1305
2,5	-0,1956	4,397	-0,0166	0,1207	4,571	0,0592	0,2787	4,607	0,0971	0,4371	4,627	0,1351
4,34	-0,1962	3,537	-0,0169	0,1221	3,688	0,0589	0,2812	3,713	0,0983	0,4405	3,723	0,1368
7,5	-0,1971	2,611	-0,0173	0,1237	2,729	0,0607	0,2839	2,744	0,0997	0,4444	2,746	0,1388
$Re=3 \cdot 10^4$												
0	-0,1976	5,287	-0,0176	0,1194	5,262	0,0585	0,2776	5,338	0,0966	0,4358	5,460	0,1345
4,34	-0,2011	2,564	-0,0193	0,1234	2,561	0,0606	0,2854	2,594	0,1004	0,4473	2,641	0,1413

полимера в растворе наблюдается большее изменение всех суммарных гидродинамических характеристик профиля. Следует отметить, что наибольшее влияние полимерные добавки оказывают на величину профильного сопротивления, относительно слабо изменяя значения подъемной силы и гидродинамического момента профиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дробленков В. В., Каневский Г. И. О построении метода расчета плоского пограничного слоя в слабых растворах полимеров с ламинарной, переходной и турбулентной зонами течения.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1977, № 3, с. 42.
2. Meyer W. A. A correlation of frictional characteristics for turbulent flow of dilute viscoelastic non-newtonian fluids in pipes.— A. I. Ch. E. Journal, 1966, v. 12, № 3, p. 522.
3. Дробленков В. В., Каневский Г. И. Расчет ближнего турбулентного плоского следа.— В кн.: Гидродинамика высоких скоростей. Л.: Судостроение, 1974, с. 213.
4. Завадовский Н. Ю., Русецкий А. А. Метод расчета давлений на лопастях гребных винтов.— В кн.: Гидродинамика высоких скоростей. Л.: Судостроение, 1977, с. 65.
5. Preston J. H. The calculation of lift taking account of the boundary layer.— Aeronaut. Res. Comm., Rep. and mem., 1953, № 2725, 40 p.
6. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Наука, 1970. 904 с.
7. Preston J. H., Sweeting N. E. The experimental determination of the boundary layer and wake characteristics of a simple Joukowski aerofoil, with particular reference to the trailing edge region.— Aeronaut. Res. Comm., Rep. and mem., 1943, № 1998.

Ленинград

Поступила в редакцию
30.IV.1980