

приближении, графически эквивалентном ППВ, имеют вид

$$(2.4) \quad \left(\frac{\partial}{\partial t} + iuk \right) P_{k,ii}(u, u_1) = - \int d\lambda \left\{ \frac{W}{2} \int_{t_0}^{t_1} dt' G(u_1, -k, t_1, t) \times \right. \\ \times P_{k',t',t}(u_1', u) P_{k'',t',t}(u_1'', u'') + W_2 \int_{t_0}^t dt G(u', k', t, t') \times \\ \left. \times P_{k,t',t}(u_1' u_1) P_{k'',t',t}(u_1'', u) \right\} \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} + iuk \right) G(u, k, t, t_1) = - \int d\lambda W_2 G(u'', k'', t, t') P_{k',t',t}(u_1, u) G(u'', k, t', t) \\ d\lambda = dk' dk'' du' du'' du_1' du_1'' \\ W_1 = H(u, k; u', k', u'', k'') H(u_1, -k; u', -k'; u_1'' - k'') \\ W_2 = H(u, k; u', k'; u'' k'') H(u', k; u', k; u'', -k'') \\ H(u, k; u' k'; u'' k'') = \{ \delta(k' + k'' - k'') H_{\alpha}^{(+)}(u, k) (\nabla_{u_{\alpha}''} \delta_{u'' - u}) + \left\{ \begin{array}{l} u' \leftrightarrow u'' \\ k' \leftrightarrow k'' \end{array} \right\} \}$$

Из структуры уравнения (2.2) видно, что константа взаимодействия, связанная с первым членом в (2.3), который обусловлен силами давления, по порядку величины равна единице при всех числах Re. Если вывести уравнение (2.4) методом [1, 2], то можно убедиться, что все доводы, которые привели к формуле (1.4), справедливы и в данном случае. Тогда, используя формулу (1.6) и учитывая, что $\lambda \sim 1$, получим

$$D_2 \sim \text{Re}^{-3/4} D_1$$

Этот результат позволяет сделать вывод, что при достаточно больших числах Re система уравнений для плотности вероятности значений турбулентной скорости в приближении прямых взаимодействий будет точной.

Поступила 18 VI 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Kraichnan R. H. Irreversible statistical mechanics of incompressible hydromagnetic turbulence. Phys. Rev., 1958, vol. 109, No. 5.
2. Kraichnan R. H. The structure of isotropic turbulence at very high Reynolds numbers. J. Fluid Mech., 1959, vol. 5, No. 4.
3. Kraichnan R. H. Decay of isotropic turbulence in the direct-interaction approximation. Phys. Fluids, 1964, vol. 7, No. 7.
4. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика, ч. 2. М., «Наука», 1967.
5. Wyld H. W. Formulation of the theory of turbulence in an incompressible fluid. Ann. Phys., 1961, vol. 14, No. 2.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М., Гостехиздат, 1953.
7. Сосинович В. А. К статистической теории турбулентности несжимаемой жидкости с точки зрения конечномерных функций распределения. В сб. «Тепло- и массоперенос», т. 8. Минск, 1972.
8. Сосинович В. А. К проблеме замыкания в статистической теории турбулентности. Докл. АН БССР, 1971, т. 15, № 9.

УДК 532.526.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОТСАСЫВАНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ТЕЛЕ ВРАЩЕНИЯ В ОПЫТОВОМ БАССЕЙНЕ

Л. Ф. КОЗЛОВ, А. И. ЦЫГАНЮК

(Киев)

В опытовом бассейне в интервале чисел Рейнольдса $\text{Re} = 1 \cdot 10^6 - 3.5 \cdot 10^6$ проведено экспериментальное исследование влияния распределенного отсасывания на гидродинамическое сопротивление и некоторые характеристики пограничного слоя на теле вращения. Полученные результаты позволили сделать вывод о возможности суще-

ственного снижения гидродинамического сопротивления (в 1,5–2 раза) и уровня пульсаций скоростей (на 10–30 дБ) в пограничном слое с помощью отсасывания через пористую обшивку небольших количеств воды (коэффициент расхода $6 \cdot 10^{-4}$).

1. Экспериментальная установка и методика исследования. Экспериментальная установка состояла из модели с проницаемой обшивкой, системы отсасывания воды из пограничного слоя и комплекта измерительной аппаратуры.

Модель представляла собой тело вращения длиной 2200 мм и наибольшим диаметром 220 мм. Носовая оконечность модели была непроницаемой и выполнена в виде половины эллипсоида вращения с соотношением осей 2 : 1. За ним располагалась цилиндрическая вставка длиной 1600 мм, которая на длине 1000 мм имела проницаемую обшивку. Этот участок состоял из стального цилиндрического каркаса с проницаемой обшивкой и был подвешен на тензометрическом динамометре. Силовые элементы тензодинамометра были закреплены между проницаемой обшивкой и осевой трубой, жестко соединенной с неподвижной основой модели. Такая измерительная схема позволила регистрировать только продольную составляющую силу, действующую на подвижную часть модели с проницаемой обшивкой. Расшифровка записей осуществлялась с помощью предварительных тарировочных испытаний.

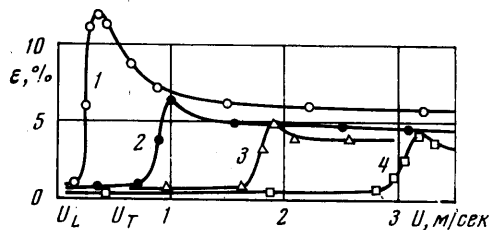
В носовой части модели на границе стыковки непроницаемого и проницаемого участков была сделана щель шириной 1 мм для полного отсасывания пограничного слоя, формирующегося на непроницаемом участке. Кормовая оконечность была хорошо обтекаемой с непроницаемой поверхностью. Между подвижным проницаемым участком и кормовой оконечностью модели имелся кольцевой зазор шириной 1 мм, затянутый заподлицо с поверхностью модели эластичной диафрагмой. Проницаемый участок был расположен в середине модели, где продольный градиент давлений на внешней границе слоя практически отсутствовал. Поэтому отсасывание воды через этот участок осуществлялось через одну камеру.

Модель закреплялась в кормовой оконечности на П-образной системе полых ножей. Трубопроводы для отсасывания воды были проложены в ножах, а отсасывание осуществлялось с помощью двух центробежных насосов. Расход отсасываемой воды измерялся с помощью расходомеров с магнитоэлектрическим датчиком. Расшифровка показаний расходомеров производилась при помощи предварительных тарировочных испытаний расходомеров и всей системы отсасывания.

В процессе испытаний для различных расходов отсасываемой воды одновременно производилось измерение скорости буксировки модели, гидродинамической силы сопротивления проницаемого участка, а также пульсаций скорости и их спектральных уровней. Скорость буксировки модели и пульсации скоростей в пограничном слое регистрировались термоанемометрической аппаратурой «DISA Electronik». Исследования проводились в интервале скоростей движения тележки $0,15 \div 4$ м/сек.

2. Влияние отсасывания на пульсации скоростей и их спектральный уровень в пограничном слое. В процессе испытаний на расстоянии 0,6 мм от поверхности модели и 1235 мм от носовой кромки устанавливался пленочный датчик. С помощью термоанемометрической аппаратуры определялся режим течения и регистрировались пульсации скорости в пограничном слое модели при различных расходах отсасываемой воды. Спектральный анализ пульсаций скорости осуществлялся с помощью анализатора.

Обработка полученных данных позволила получить зависимость степени турбулентности в пограничном слое от скорости буксировки модели. На фиг. 1 кривые 1–4 соответствуют коэффициентам расхода $c_0 = 0, 6 \cdot 10^{-4}, 1,2 \cdot 10^{-3}, 3 \cdot 10^{-3}$. При малых скоростях буксировки без отсасывания режим течения в пограничном слое в месте установки датчика термоанемометра оставался ламинарным. Это обстоятельство характеризовалось малой и не зависящей от скорости величиной степени турбулентности. При увеличении скорости граница ламинарного участка в слое перемещалась к носовой части модели. При некоторой скорости $U = U_L$, когда граница ламинарного участка находилась в месте установки датчика, степень турбулентности резко возрастала. При дальнейшем увеличении этой скорости степень турбулентности возрастала до некоторого максимального значения, а затем начинала несколько уменьшаться. Значение скорости $U = U_L$, соответствующее на графике переходу от более резкого изменения степени турбулентности к плавному, принималось за начало турбулентного участка [1^{-3}].



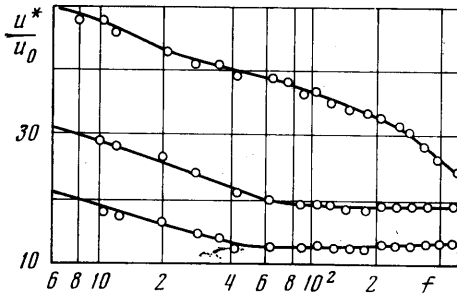
Фиг. 1

Анализ данных, приведенных на фиг. 1, позволил определить критические скорости буксировки модели U_L , до которых режим течения в пограничном слое на управляемом участке оставался ламинарным.

Значения критических скоростей буксировки модели в зависимости от расхода отсасываемой жидкости приведены ниже.

c_Q	0	$6 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
$U_L, \text{м} \cdot \text{сек}^{-1}$	0.15	0.7	1.7	2.8

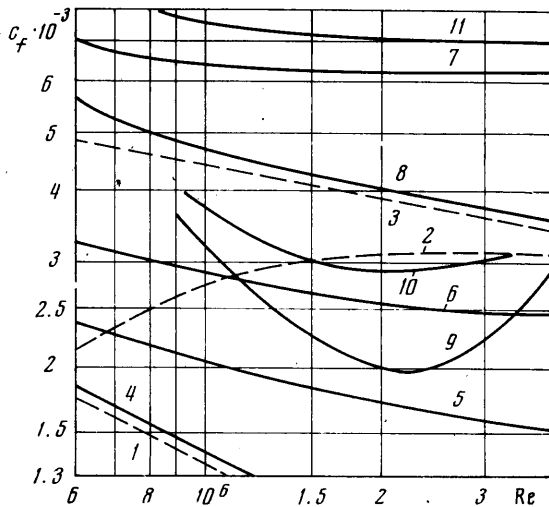
Одновременно исследовалось влияние отсасывания на спектральные уровни пульсаций скорости в слое в интервале частот 6–500 *гц*. Спектральный анализ пульсаций проводился с помощью фильтров с постоянной относительной шириной прозрачности, равной 7%.



Фиг. 2

Результаты анализа, приведенные к полюсе 1 *гц*, для скорости буксировки 2.5 *м/сек* и различных коэффициентов расхода даны на фиг. 2 в виде зависимости от частоты f осредненной величины u^* пульсационной скорости, отнесенной к $u_0 = 1.25 \cdot 10^{-4}$ *м/сек*. Кривые 1–3 соответствуют $c_Q = 0, 1.5 \cdot 10^{-3}, 2.5 \cdot 10^{-3}$. Из анализа этих данных следует, что отсасывание небольших количеств воды позволило весьма существенно (на $10 \div 30$ *дб*) снизить уровень турбулентных пульсаций скорости в рассмотренном интервале частот.

3. Влияние отсасывания на гидродинамическое сопротивление. Буксировочные испытания модели в оптовом бассейне с измерением буксировочного сопротивления проводились в интервале $Re = 7 \cdot 10^5 \div 4 \cdot 10^6$ для $c_Q = 0, 6 \cdot 10^{-4}, 1.2 \cdot 10^{-3}$ и $3 \cdot 10^{-3}$. Обработка полученных данных позволила получить зависимость коэффициента буксировочного сопротивления c_f от Re . На фиг. 3 приняты обозначения: 1 – ламинарное течение для пластины без отсасывания; 2 – переходное течение



Фиг. 3

для пластины без отсасывания; 3 – турбулентное течение для пластины без отсасывания; 4, 5, 6, 7 – теоретический расчет для тела вращения при различных расходах отсасываемой жидкости [4]; 8, 9, 10, 11 – результаты буксировочных испытаний.

Анализ полученных данных показал, что для $c_Q = 6 \cdot 10^{-4}$ и $Re = 1 \cdot 10^6 \div 3.5 \cdot 10^6$ буксировочное сопротивление при отсасывании снизилось в 1.5–2 раза. Для $c_Q = 3 \cdot 10^{-3}$

сопротивление с отсасыванием оказалось больше соответствующей величины без отсасывания. При этом исследования режима течения в пограничном слое показали, что до $Re=3.5 \cdot 10^6$ на управляемом участке пограничный слой оказался ламинарным. В этом случае существенное повышение буксировочного сопротивления объяснялось большим расходом отсасываемой воды, поскольку коэффициент сопротивления приблизительно равен удвоенному значению коэффициента расхода.

Поступила 14 VII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов Л. Ф. Электротермический метод исследования пограничного слоя моделей при испытаниях в опытовом бассейне. Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 1960, вып. 155.
2. Козлов Л. Ф. Исследование перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный на пластине в опытовом бассейне. Сб. «Гидромеханика», 17. Киев, «Наукова думка», 1971.
3. Klebanoff P. S. Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient. NACA Rept 1247, 1955.
4. Козлов Л. Ф., Цыганюк А. И. Использование полиномов шестой степени для расчета пограничного слоя при наличии отсасывания. Прикл. механ., 1966, т. 2, вып. 11.

УДК 532.526.2

УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХСЛОЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ

Б. П. КОЛОБОВ, А. Г. СЛЕПЦОВ

(Новосибирск)

В работе излагаются результаты численного исследования устойчивости двухслойного несжимаемого пограничного слоя на плоской пластине. В [1] асимптотическим методом исследуется линейная задача устойчивости плоских двухслойных течений Пуазейля и Куэтта к плоским возмущениям. Для плоских возмущений в виде волн задача устойчивости двухслойных плоскопараллельных течений сводится к задаче на собственные числа и собственные функции для уравнения Orra-Зоммерфельда с разрывными коэффициентами на отрезке $0 \leq y \leq \eta$

$$(1) \quad (D^2 - \alpha^2)^2 \varphi(y) - i\alpha R\tau [(U(y) - c)(D^2\alpha^2) - U''(y)]\varphi(y)$$

Здесь y — координата, отсчитываемая по нормали к пластине, η — внешняя расчетная граница пограничного слоя, $D = d/dy$, α — волновое число, параметр $c = c_r + ic_i$, c_r — фазовая скорость, c_i — коэффициент нарастания, $U(y)$ — продольная компонента скорости течения, R — число Рейнольдса. Все величины, входящие в (1), безразмерные. Соответствующие им размерные величины будем отмечать звездочкой. Первый слой, прилегающий к пластине, находится в области $0 \leq y \leq \lambda$, а второй — в области $\lambda \leq y \leq \eta$. Обозначим через ρ_i , ν_i , μ_i ($i=1, 2$) соответственно плотность, коэффициент кинематической и динамической вязкости каждого из слоев. Соотношения между размерными и безразмерными величинами имеют вид

$$y = y^*/l, \quad \alpha = \alpha^*l, \quad c = c^*/U_\infty^* \quad U = U^*/U_\infty^*, \quad R = \sqrt{U_\infty^* x^*}/\nu_2, \quad l = \sqrt{\nu_2 x^*/U_\infty^*}$$

где x^* — координата, отсчитываемая вдоль пластины от передней ее точки в направлении скорости набегающего потока U_∞^* , l — масштаб длины.

В первом и втором слоях соответственно имеем

$$\varphi(y) = \varphi_1(y), \quad U(y) = U_1(y), \quad \tau = \tau_1 = \nu_2/\nu_1$$

$$\varphi(y) = \varphi_2(y), \quad U(y) = U_2(y), \quad \tau = \tau_2 = 1$$