

УДК 532.526.4:597.31

КОМПЛЕКСНОЕ ВЛИЯНИЕ ПОДАТЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТИ И ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ДОБАВОК НА ТУРБУЛЕНТНОЕ ТРЕНИЕ

В. И. КОРОБОВ

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 03.02.2000

Експериментально досліджено в діапазоні чисел Рейнольдса $10^6 \div 2 \cdot 10^7$ турбулентне трення на продольно обтекаємому жорсткому циліндрі та циліндрі з еластичним покриттям при подачі в пристеночну область через носову щель водного розчину поліоксietилена. Для аналога зовнішніх покривів гідробіонтів при комплексній дії одержано підвищення гідродинамічної ефективності по порівнянню з застосуванням окремих факторів.

Експериментально досліджено турбулентне трення при числах Рейнольдса $10^6 \div 2 \cdot 10^7$ на вповодж обтічних жорсткому циліндрі та циліндрі з еластичним покриттям при інжекції в пристінну область через носову щілину водного розчину поліоксietилена. Для аналога зовнішніх покривів гідробіонтів при комплексній взаємодії одержано підвищення гідродинамічної ефективності в порівнянні із застосуванням окремих факторів.

Turbulent friction on longitudinally flowed the rigid cylinder and cylinder with elastic coating experimentally is investigated in a range of Reynold's numbers $10^6 \div 2 \cdot 10^7$ at feeding in near wall area through a nose slot of a water solution of polyoxiethylen. For analog of hydrobionts outside covers at complex action the raise of hydrodynamic effectiveness on a comparison with application of the separate factors is obtained.

ВВЕДЕНИЕ

В результате эволюции в природе у летающих и плавающих объектов выработаны различные механизмы и приспособления, направленные на повышение эффективности (к.п.д.) или быстродействия, что помогает выживанию (жизнеобеспечению) разновидности в экологической нише. Так, особенности геометрии внешних обводов ряда гидробіонтов способствуют уменьшению отрывных зон и снижению сопротивления формы. Различные морфологические особенности строения наружных покровов направлены на снижение турбулентного трения. Они весьма многообразны и действуют на различные области пограничного слоя [1].

Известно, что у ряда быстроплавающих гидробіонтов есть приспособления для инъекции биополимера (слизи) через жаберные щели или из специальных желез и ампул в специфических зонах пограничного слоя, что помогает существенно снизить сопротивление, по меньшей мере, на форсированных режимах плавания.

Наружные покровы быстроплавающих морских животных (дельфинов и др.) и рыб (чешуя акулы, меч-рыбы) имеют продольные микроскладки, способствующие организации и поддержанию статистически упорядоченных, направленных вдоль по потоку когерентных вихревых структур в пограничном слое, которые способствуют уменьшению

гидродинамических потерь.

Также наблюдается образование у рыб гребешкоподобной чешуи в зоне турбулентного обтекания, причем обычно только в области турбулентного потока [2]. Поскольку высота гребешков меньше допустимой высоты шероховатости и они, в отличие от предыдущего случая, не оказывают непосредственного (прямого) структурирующего воздействия на поток, то в этом случае предполагают, что зубоподобная структура этих чешуек может помочь удерживать диффузионно активную биополимерную слизь в критической пристенной области. Это, с одной стороны, позволяет уменьшить расход (вымывание) гидродинамически активного полимера, а с другой стороны, удерживаемый полимер образует тонкий и очень податливый вязко-упругий слой с достаточно большим коэффициентом поглощения. Тогда он выступает как элемент (1-ый слой) сложного (анизотропного) покрытия, которое, помимо демпфирования, в сочетании с гребешками выполняет функцию "перевернутых" рыблет. Это лишь один пример мультифункциональности наружного покрова гидробіонтов.

В живой природе одновременно реализуется и работает комплексно несколько механизмов, направленных на уменьшение энергетических потерь при движении в среде обитания.

В технике известны различные способы управления пристенными течениями [3 – 6]. Один

из классов воздействий на пристенную турбулентность охватывает различные проявления, обусловленные приданием обтекаемой поверхности вязкоупругих свойств (податливости) [6 – 9]. Другой важный класс воздействий на пристенные турбулентные течения определяется добавлением к жидкости ничтожных концентраций специальных высокомолекулярных полимерных добавок - эффект Томса. Этот класс задач гидромеханики достаточно хорошо исследован [10]. Однако остаются практически не изученными комбинированные методы управления пристенными течениями.

Одной из первых опубликованных работ, в которой предложены комбинированные методы, включающие совместное воздействие податливости обтекаемой стенки и полимерных добавок на пограничный слой, являлась работа [11]. Экспериментальная проверка комбинированного метода воздействия на интегральные характеристики пограничного слоя податливости стенки и полимерных добавок сделана в [12], а попытка объяснения механизма комплексного влияния на пограничный слой приведена в работах [9, 13 – 15].

Теоретически решить задачу об одновременном применении хотя бы двух методов весьма затруднительно вследствие отсутствия достаточно надежных объяснений особенностей физических механизмов отдельных методов управления пристенными течениями и сложностей замыкания граничных условий, поэтому целесообразным представляется накопление экспериментальных данных.

Цель настоящих исследований состоит в том, чтобы экспериментально оценить влияние модифицированных граничных условий, а именно, совместное влияние податливости стенки и малых добавок в пристенную область потока водного раствора высокомолекулярного полимера на интегральные характеристики пограничного слоя по сравнению с таковыми при обтекании твердой поверхности.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование осуществлялось на продольно обтекаемых стенках с поперечной кривизной - на эластичной и жесткой цилиндрических поверхностях. При соблюдении соответствующих критериев подобия (геометрических, по числу Рейнольдса и др.) и допущения, что радиус поперечной кривизны поверхности (r) больше толщины пограничного слоя (δ) [19], т.е.

$$\delta/r < 1, \quad (1)$$

результаты исследований интегральных характеристик пограничного слоя на плоской пластине и на продольно обтекаемых цилиндрах можно корректно сопоставлять. Но переход от испытаний на пластине к проведению экспериментов на цилиндрических поверхностях дает определенные преимущества. Во-первых, это продиктовано необходимостью обеспечения надежного закрепления податливого покрытия, особенно в районе передней кромки, так как обрыв незначительной части покрытия или образование местных отслоений эластичного слоя от жесткого основания (хлопуны) приводит к местным флаттерным эффектам и резкому изменению структуры течений в пристенной области вниз по потоку и, как следствие, к непредсказуемым и не поддающимся анализу результатам. Эти требования технологически легче обеспечить на эластичной стенке цилиндрической формы. Кроме того, необходимо обеспечить гидравлическую гладкость обтекаемой поверхности эластичного покрытия. Поэтому эластичное покрытие изготавливалось путем нанесения исходных компонентов на металлическую подложку с последующей полимеризацией в полированной цилиндрической форме. Во-вторых, на продольно обтекаемом цилиндре легче обеспечить равномерную подачу раствора полимера в пограничный слой по размаху всей поверхности поперек потока. В-третьих, исключается влияние боковых стенок, торцевых эффектов, и с этой точки зрения результаты исследований могут быть сопоставимы с данными испытаний продольно обтекаемой пластины бесконечного размаха.

Измерения гидродинамического трения продольно обтекаемых жесткого цилиндра и цилиндра с модифицированными граничными условиями осуществляли с помощью тензодинамометра при буксировке в гидроканале в диапазоне скоростей $U = 2.0 \div 22.0$ м/с. Наружный диаметр цилиндра $d = 0.175$ м, удлинение $\lambda_{\text{цил}} = L_{\text{цил}}/d = 5.65$, а удлинение цилиндра с носовым обтекателем $\lambda = 6.07$. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

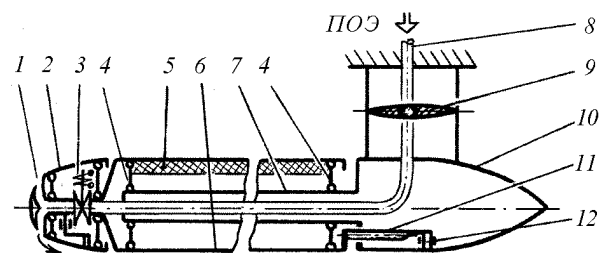


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

С помощью пилона 9 она подвешивалась к буксировочной тележке. Цилиндр с исследуемой твердой 6 или эластичной 5 поверхностью размещен на тензоподвеске, кинематическими элементами которой служат упругие мембраны 4, закрепленные на штоке 7, который является частью корпуса 10. Для кинематической развязки между цилиндром 5 (6) и корпусом 10 выполнен зазор $k = 8.0 \cdot 10^{-5}$ м. Сила гидродинамического сопротивления трения, действующая на поверхность испытуемого цилиндра (5 или 6) с носовым обтекателем 2, через шток 11 передается на тензометрический датчик усилий 12 и регистрируется.

Инжекция раствора полимера в пограничный слой осуществлялась по касательной к обтекаемой поверхности через кольцевую щель 1 размером $s = 3.0 \cdot 10^{-4}$ м в носовом обтекателе 2. Кромка щели 1 отстоит от передней критической точки обтекателя вдоль по его образующей на расстоянии $0.38(d/2)$. Величина расхода полимера варьировалась путем изменения давления в магистрали наддува 8. Управление выпуском осуществлялось с помощью электромагнитного запорного клапана 3. Методика и техника эксперимента изложены в работах [12, 17, 18].

Для сопоставления результатов в качестве эталонных приняты данные измерений гидродинамического трения на твердой стенке при различных числах Рейнольдса (рис. 2, кривая 1). В качестве твердой стенки использовали металлический цилиндр с полированной наружной поверхностью. В опытах получали значение $\delta/(d/2) < 0.165$, т.е. выдерживался критерий (1). На рисунке нанесены границы погрешности измерения коэффициента трения $\sigma_{\Delta R-1}$ и $\sigma_{\Delta R-2}$ соответственно в двух диапазонах буксировочных скоростей ($10^6 < Re_1 < 1.2 \cdot 10^7$; $1.2 \cdot 10^7 < Re_2 < 2 \cdot 10^7$). Разбивка на два диапазона выполнена с целью повышения точности измерений и обусловлена различным коэффициентом усиления силоизмерительной регистрирующей аппаратуры.

При числах Рейнольдса меньше $5 \cdot 10^6$, наблюдается некоторый загиб экспериментальной кривой, обусловленный ростом волнового сопротивления из-за влияния свободной поверхности бассейна по мере приближения к критическому значению по числу Фруда ($Fr \approx 0.5$ в начале диапазона буксировочных скоростей; заглубление модели $h_m/d=2.4$, где h_m – расстояние от оси модели до поверхности воды в бассейне). В диапазоне чисел Рейнольдса $5 \cdot 10^6 \div 1.5 \cdot 10^7$ экспериментальная зависимость коэффициента трения эталонного жесткого цилиндра с учетом расчетной поправки Δ на величину его донного сопротивления в зоне

кинематической развязки тензоподвески (кривая 4) достаточно хорошо совпадает с соответствующей зависимостью для гладкой жесткой пластины. При числах Рейнольдса больше, чем $1.5 \cdot 10^7$, начинает возрастать коэффициент сопротивления эталонной жесткой поверхности по сравнению с известным значением для гладкой пластины при турбулентном обтекании (кривая 3), что обусловлено проявлением шероховатости с ростом скорости набегающего потока.

Учитывая, что в основу настоящих опытов положен сравнительный эксперимент при испытаниях геометрически одинаковых жесткой и эластичной поверхностей, введение поправок на указанные факторы, а также учет систематической погрешности Δ не обязательны и достаточно сопоставить гидродинамический эффект ξ в каждом отдельном случае (или серии испытаний).

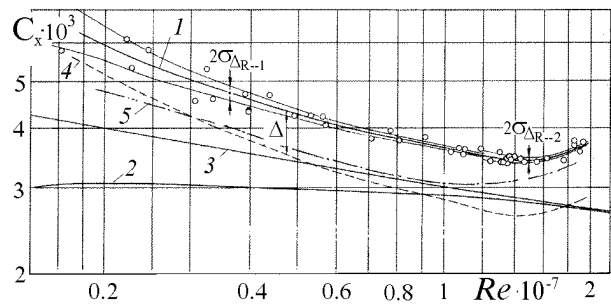


Рис. 2. Коэффициент сопротивления продольно обтекаемого эталонного цилиндра с твердой поверхностью (1) при различных числах Рейнольдса [17]; $\sigma_{\Delta R}$ – погрешность измерения коэффициента сопротивления; 4 – с учетом поправки Δ на донное сопротивление; 5 – то же, что и 1, но с добавкой раствора полимера; при этом закон изменения коэффициента расхода ПОЭ по числам Re соответствует кривой В на рис. 3; 2, 3 – закон сопротивления жесткой пластины при переходном и турбулентном течениях [19]

В качестве податливой стенки использовали цилиндр с эластичным покрытием из полиуретана толщиной $t/(d/2) = 1.71 \cdot 10^{-2}$ и плотностью $\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$. Наружный диаметр эластичного цилиндра равен диаметру жесткого эталона. Результаты измерений динамических вязкоупругих характеристик эластомера в диапазоне частот $0 < \omega < 320 \text{ с}^{-1}$ приведены в работе [8]. Отметим, что статический и динамический модули упругости эластомера соответственно равны $1.6 \cdot 10^3$ и $5 \cdot 10^3$ кПа. Коэффициент механических потерь на частотах до 100 с^{-1} составлял порядка 0.53, а на частотах до 300 с^{-1} возрастал до значения 0.7.

В качестве высокомолекулярных добавок приме-

няли водный раствор полиоксиэтилена (ПОЭ) с молекулярным весом $M_w = 4 \cdot 10^6$ при весовой концентрации $\alpha = 10^{-3}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На жесткой и податливой поверхностях проведены соответственно по две серии экспериментов А и В, которые отличались между собой по количеству неньютоновской жидкости, впрыскиваемой в пограничный слой. Величина коэффициента объемного расхода C_q , в опытах в зависимости от числа Re набегающего потока представлена на рис. 3. $C_q = Q/US$, где $Q = V/\tau$ – объемный расход раствора полимера; V – объем впрыснутого полимера; τ – продолжительность его инъекции; U – скорость движения буксировочной тележки; S и L – соответственно площадь смоченной поверхности и длина тензометрируемого цилиндра; $Re_L = UL/\nu$, ν – коэффициент кинематической вязкости.

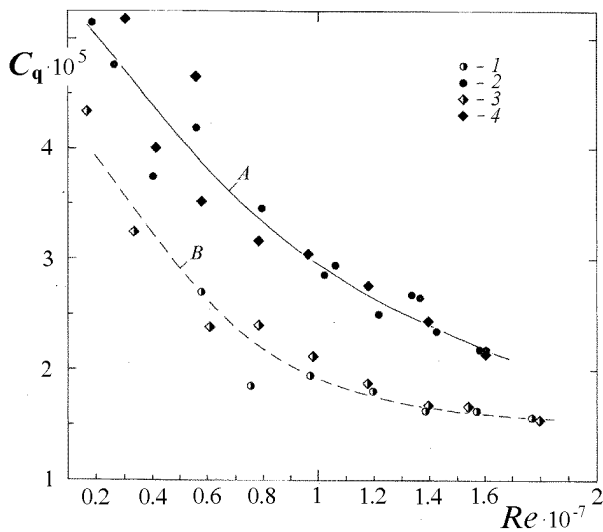


Рис. 3. Величина коэффициента объемного расхода раствора ПОЭ по числам Рейнольдса

Результаты измерений сопротивления трения жесткого и эластичного цилиндров при различных режимах обтекания с подачей на их поверхность раствора полимера низкой концентрации представлены на рис. 4 в виде зависимостей величины интегрального эффекта $\xi(Re)$ от числа Рейнольдса (кривые 1-5). $\xi(Re) = (C_{xэт} - C_{xi})/C_{xэт}$, где $\xi(Re)$ – коэффициент относительного изменения гидродинамического трения по числам Рейнольдса; $C_{xэт}$ –

коэффициент трения эталонной жесткой поверхности; C_{xi} – коэффициент трения с модифицированными граничными условиями.

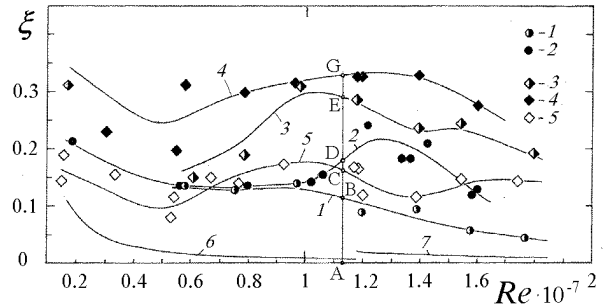


Рис. 4. Коэффициент снижения сопротивления $\xi(Re)$ по числам Рейнольдса: при инъекции полимерных добавок в пограничный слой на твердой (1, 2) и эластичной (3, 4) поверхностях; 5 – без полимерных добавок ($C_q = 0$) на эластичной поверхности. Для экспериментальных кривых 1, 3 закон подачи ПОЭ соответствовал расходу $C_q(Re)$ по закону В, для кривых 2, 4 – по закону А (см. рис. 3); 6, 7 – относительная среднеквадратичная погрешность измерений в опытах коэффициента сопротивления по числам Рейнольдса $\sigma_{\Delta C_x}/C_x = f(Re)$

Из результатов эксперимента видно, что введение небольшого количества ($C_q \sim (2 \div 5) \cdot 10^{-5}$) раствора полимера низкой концентрации в турбулентный пограничный слой на жесткой поверхности приводит к снижению сопротивления трения (см. рис. 2, кривая 5), причем величина эффекта больше в случае с большим количеством добавки. Последнее хорошо наблюдается в диапазоне $Re > 1 \cdot 10^7$, где отчетливо видно различие в величине коэффициента расхода между сериями А и В: так задается $C_{qA} > C_{qB}$, и соответственно регистрируется $\xi_2 > \xi_1$. Здесь индекс при ξ соответствует номеру кривой на рис. 4. На податливой поверхности наблюдается такая же картина – $\xi_4 > \xi_3$. Более того, величина эффекта на эластичной стенке выше, чем при подаче полимера в пристенную область с жесткой границей при одинаковых расходах, т. е. соответственно имеем $\xi_3 > \xi_1$ и $\xi_4 > \xi_2$. При этом интересен факт аддитивности эффектов отдельно от воздействия эластичной стенки по отношению к жесткому эталону и отдельно от впрыска неньютоновской жидкости в пристенную турбулентность на жесткой границе [12, 13]. Так, из экспериментального графика на рис. 4 видно, что, с учетом погрешности эксперимента, $AC + AB = AE$; $AC + AD = AG$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известно, что введение ассоциатов полимерных молекул вносит основной вклад в изменение Рейнольдсовых напряжений вблизи стенки (в буферной зоне). Одно из проявлений воздействия вязкоупругого покрытия на турбулентный пограничный слой оценивается как следствие его работы в качестве энергопоглощающей стенки, откликающейся на воздействия крупномасштабной структуры пристенной турбулентности. Суммирование эффекта может служить косвенным подтверждением механизмов воздействия указанных факторов на пограничный слой. Комплексное воздействие имеет, безусловно, сложный и нелинейный характер. При этом возможно также некоторое видоизменение микроструктуры статистически упорядоченных течений в пристенной области.

Рассматривая проведенный эксперимент как моделирование работы одного из аналогов наружных покровов гидробионтов, можно говорить о комплексном механизме воздействия на омывающий его поток.

1. *Bushnell D. M., Moore K. J.* Drag reduction in nature // *Annu. Rev. Fluid Mech.*– 1991.– **23**.– С. 65–79.
2. *Першин С. В., Чернышов О. Б., Козлов Л. Ф., Коваль А. П., Заец В. А.* Закономерность в покровах скоростных рыб // *Бионика*.– 1976.– **10**.– С. 3–21.
3. *Басин А. М., Короткин А. И., Козлов Л. Ф.* Управление пограничным слоем судна.– Л.: Судостроение, 1968.– 391 с.
4. *Чжен П. (Chang P. K.)* Управление отрывом потока.– М: Мир, 1972.– 552 с.
5. *Богдевич В. Г., Кобец Г. Ф., Козюк Г. С., Мигиренко Г. С., Микута В. И., Миронов Б. П., Новиков Б. Г., Тэтянко В. А., Штатнов Ю. В.* Некоторые вопросы управления пристенными течениями // *Прикл. механика и техн. физика*.– 1980.– **5**.– С. 99–109.
6. *Bushnell D. M.* Turbulent drag reduction for external flows // *AIAA Pap.*– 1983.– N **83-0227**.– С. 1–20.
7. *Kramer M. O.* Boundary layer stabilization by distributed damping // *J. Am. Soc. Naval Eng.*– 1960.– **72**, N 1.– С. 25–33.
8. *Коробов В. И., Бабенко В. В.* Об одном механизме взаимодействия эластичной стенки с потоком // *Инж.-физ. журн.*– 1983.– **44**, N 5.– С. 730–733.
9. *Бабенко В. В., Канарский М. В., Коробов В. И.* Пограничный слой на эластичных пластинах.– Киев: Наукова думка, 1993.– 264 с.
10. *Пилипенко В. Н.* Влияние добавок на пристенные турбулентные течения.– *Итоги науки и техники: Механика жидкости и газа*, М.– ВИНТИ АН СССР с.198015156–257
11. *А. С. № 483538 СССР, Кл. F 15D 1/12* Демпфирующее покрытие / В. В. Бабенко, Л. Ф. Козлов, В. И. Коробов // *Опубл. 05.09.75.*– 1975.– **Бюл.33**.– С. 1–3.
12. *Коробов В. И.* Влияние податливых поверхностей на интегральные характеристики пограничного слоя: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.– Киев: ИГМ АН УССР, 1982.– 20 с.
13. *Коробов В. И.* О совместном влиянии податливой поверхности и полимерных добавок на интегральные характеристики пограничного слоя // *Тр. III Республ. конф. "Проблемы гидромеханики в освоении океана"*.– Киев, ИГМ АН УССР, 1984.– С. 243.
14. *Кулик В. М., Погуда И. С., Семенов Б. Н., Юшманова Т. И.* Влияние скорости потока при совместном действии податливой поверхности и полимерных добавок на турбулентное трение // *Изв. СО АН СССР*.– 1987.– **4**, N 15.– С. 42–46.
15. *Коробов В. И.* Совместное влияние податливости поверхности и полимерных добавок на пограничный слой // *Бионика*.– 1993.– **26**.– С. 27–31.
16. *Гиневский А. С., Колесников А. В., Почкина К. А.* Экспериментальное исследование осесимметричного пограничного слоя на продольно обтекаемом пограничном слое // *Ученые записки ЦАГИ*.– 1971.– **2**, N 4.– С. 52–61.
17. *Коробов В. И., Бабенко В. В.* К методике измерений интегральных характеристик пограничного слоя // *Гидромеханика*.– 1983.– **48**.– С. 51–54.
18. *Бабенко В. В., Козлов Л. Ф., Иванов В. П., Коробов В. И.* Экспериментальное исследование взаимодействия пограничного слоя с инжектируемой полуграничной струей // *Гидромеханика*.– 1983.– **47**.– С. 28–35.
19. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя.– М.: Наука, 1969.– 742 с.