

УДК 532.526

Интерференционное действие слабоподатливых границ в градиентных течениях

Б.Н. Семенов

Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: boris_n_semenov@mail.ru

Условия возможности снижения гидродинамического сопротивления податливыми покрытиями рассмотрены с двух позиций: затягивания ламинарного течения и изменения порождения турбулентности в пристенной области. Отмечены сильное влияние продольного градиента давления и целесообразность поиска ламинаризованных обводов при наличии податливых покрытий.

Ключевые слова: снижение сопротивления, податливое покрытие.

Введение

Успехи в создании и исследовании податливых покрытий для снижения гидродинамического сопротивления [1] побуждают к поиску и изучению возможных объектов для их применения и технических условий использования покрытий. Во многих случаях это течения с высоким градиентом давления вдоль потока.

Цель настоящей работы — оценить перспективы исследования слабоподатливых покрытий в градиентных течениях.

Рассмотрение влияния слабоподатливых покрытий на градиентное течение предлагается, например, как важный практически реализуемый вариант изучения интерференционного действия податливых границ на течение в коллапсирующих трубах [2]. Градиентный тип течения обуславливается крупноамплитудными активными волновыми перемещениями границы с длинами волн во много раз большими, чем средний диаметр трубы. Пассивные перемещения податливой границы имеют место под действием турбулентных флуктуаций давления в акустическом диапазоне частот. Для снижения сопротивления амплитуды таких перемещений должны быть очень малы и удовлетворять требованию гидравлической гладкости. Длины этих волн порядка диаметра трубы.

Другой пример внешнего обтекания — это движение рыб, дельфинов [3]. В этом случае амплитуды активных волновых движений могут быть порядка полуметра, а длины волн — несколько метров. Волновые же перемещения поверхности под действием флуктуаций давления имеют максимальные длины волн в сантиметровом диапазоне, а максимальные амплитуды — несколько десятков микрон.

Крупноамплитудные активные волновые перемещения границы создают условия для эффективной ламинаризации течения в конфузорной части потока и для турбулизации течения в диффузорной части. Поэтому должны быть рассмотрены два класса задач:

во-первых, влияние слабоподатливой пассивной поверхности на устойчивость конфузорного ламинарного течения и, во-вторых, изменение генерации турбулентности в диффузорном турбулентном течении над такой же поверхностью, где неминуемы либо турбулизация, либо отрыв ламинарного течения.

Таким образом, одно и то же податливое покрытие, предназначенное для снижения сопротивления, должно выполнять две периодически меняющиеся функции. Реализуемость такой возможности показывается сравнением требований к вибрационным характеристикам покрытий, обеспечивающих увеличение устойчивости ламинарного течения и уменьшение генерации турбулентности в турбулентном течении.

1. Интерференционное действие податливого покрытия

Анализируется интерференционное действие обтекаемой границы на пристенное течение. В работе [4] при описании решения задачи об устойчивости ламинарного пограничного слоя указывалось, что результат есть суммарное действие двух волн флуктуаций скорости в пристенной области — одной, бегущей к стенке из пограничного слоя, и другой, отраженной от стенки.

Используемые волновые теоретические модели порождения турбулентности, предложенные авторами работ [5–7], также демонстрируют интерференционный характер порождения турбулентности. Поле флуктуаций скорости, а также Рейнольдсовы напряжения образуются в результате сложения двух волн: первой, идущей из турбулентного ядра, являющегося мощным стабильным генератором длинноволновых возмущений, и второй, отраженной от стенки.

Податливость границы свойствам ведет к изменению отраженной волны флуктуаций скорости и интерференционной картины порождения турбулентности. Перемещение стенки y_0 происходит под действием флуктуаций давления с частотой ω и запаздыванием θ по фазе:

$$y_0 = -\frac{P_0}{C_d} \exp i(k_x x + k_z z - \omega t + \theta).$$

Здесь P_0 — амплитуда флуктуаций давления, C_d — это динамическая жесткость покрытия, k_x, k_z — волновые числа в направлении осей x, z .

Как показывают результаты расчетов и экспериментов [1], [8], действие податливости границы может вести как к повышению, так и к понижению устойчивости ламинарного течения; как к уменьшению, так и к увеличению турбулентных напряжений в вязком подслое турбулентного течения в зависимости от волновых свойств податливой границы. Основной моделирующий параметр — это комплексная податливость границы пропорциональная $\exp(i\theta)/C_d$, где $0 \leq \theta \leq 180^\circ$.

2. Требования к вибрационным характеристикам покрытий для снижения сопротивления

2.1. Диссипативные свойства покрытия

Апериодичность турбулентных флуктуаций и их широкий спектр ведут к первому логическому условию, согласно которому покрытие не должно иметь каких-либо свободных колебаний в рассматриваемом диапазоне частот турбулентности. Только такой подход позволяет получить однозначное решение. Практически можно рассматривать достаточно быстрое затухание свободных колебаний. Это условие является физически строго необходимым, потому что решение однозначно лишь тогда, когда от каждой локальной пульсации давления на стенке свободные поверхностные волны не расходятся во все стороны, и когда перемещения поверхности вынужденно следуют за нестационарным давлением.

Анализ результатов опытов [1] подтверждает необходимость первого условия как для ламинаризации пограничного слоя, так и для снижения турбулентного трения.

2.2. Ограничение модуля податливости покрытия

Второе логическое условие, следуя требованию гидравлической гладкости колеблющейся поверхности, состоит в ограничении модуля податливости. Это ограничение возникает как необходимое условие при постановке задачи о взаимодействии податливой границы и вязкого подслоя, поскольку вязкий подслей существует только около гладкой стенки. Проводя аналогию с влиянием на трение распределенной шероховатости, предполагается, что перемещения поверхности под действием пульсационных давлений должны быть меньше критической высоты бугорков шероховатости k_s , согласно условию $U_0 k_s / \nu \leq 70$. Итак, согласно второму условию, определяется требуемая жесткость вязкоупругой границы для снижения турбулентного трения:

$$C_d \geq 0,007 \rho U_0^3 \text{Re}_0^{-0,3} / \nu.$$

Для ламинарного пограничного слоя имеем достаточно близкое аналогичное ограничение из условия отсутствия влияния песочной шероховатости на положение ламинарно-турбулентного перехода. Согласно работе [9], необходимо выполнение условия

$$U_0 k_s / \nu < 120.$$

2.3. Фазовое условие

С учетом сделанных ограничений физический смысл действия вязкоупругой границы — его интерференционную природу — характеризует фазовый сдвиг θ , из анализа которого определяется требуемая частотная характеристика покрытия.

Сравним значения фазового сдвига, необходимые для снижения трения при ламинаризации пограничного слоя и уменьшении генерации турбулентности.

На рис. 1 показана зависимость (для $\rho U_0^2 / (\delta C_d) = 0,1$) критического числа Рейнольдса, построенного по толщине вытеснения пограничного слоя, от фазового сдвига. Здесь использованы результаты расчетов Короткина [10]. Видим, что только для узкой области θ наблюдается увеличение устойчивости ламинарного пограничного слоя.

На рис. 2 показана зависимость коэффициента, обратно пропорционального постоянной Кармана, от фазового сдвига в турбулентном течении. Здесь приведены результаты

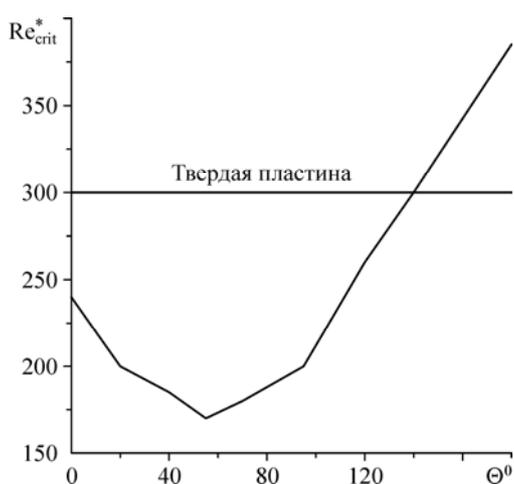


Рис. 1. Зависимость критического числа Рейнольдса для профиля Блазиуса ламинарного пограничного слоя от фазового сдвига.

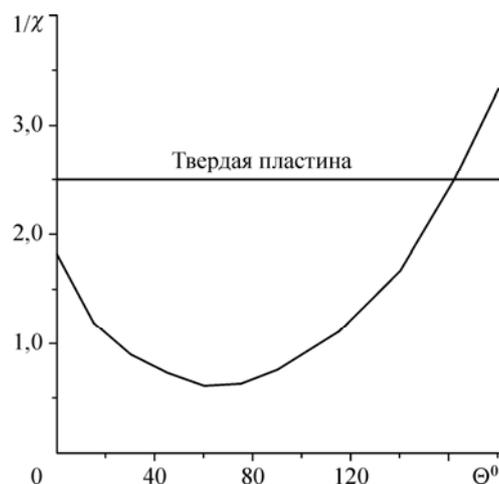


Рис. 2. Зависимость коэффициента, обратно пропорционального постоянной Кармана, от фазового сдвига.

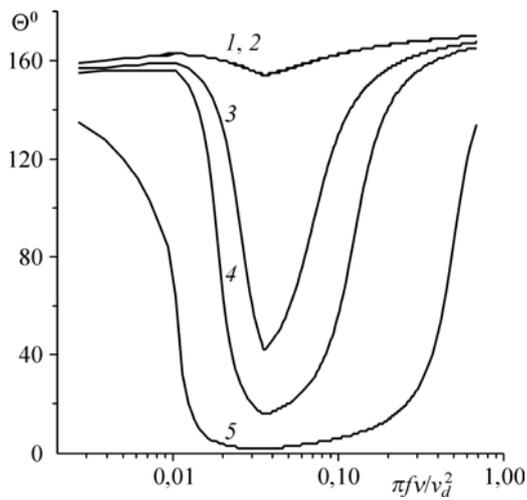


Рис. 3. Зависимость ФЧОПД для гладкой податливой поверхности от структуры флуктуаций скорости (k_z/k_x): $k_z/k_x = 0$ (1), $1/12$ (2), $0,8$ (3), 1 (4), $1,6$ (5); $Re_0 = 10^7$.

расчетов [11], где использовалась моногармоническая модель [7] пристенной турбулентности. Видно, что уменьшение порождения турбулентности наблюдается также лишь для узкой области θ . Оба рисунка очень похожи.

Теперь обратимся к оценке различий двух подходов. Проиллюстрированные расчеты были выполнены для плоских колебаний ($k_z/k_x \rightarrow 0$). Рассмотрение плоских колебаний оправдано

для задачи устойчивости ламинарного течения, но несправедливо для турбулентного течения, в котором флуктуации сугубо трехмерны. Согласно опытам Лауфера [12], $0,65 \leq k_z/k_x \leq 2,2$. Результаты расчета [13] (с использованием модели Штернберга [5]) фазочастотной области положительного действия вязкоупругой границы для различных значений отношения волновых чисел показаны на рис. 3 (расчет выполнен для числа Рейнольдса, построенного по абсциссе начала покрытия $Re_0 = 10^7$). На оси абсцисс показана циклическая частота флуктуаций, обезразмеренная вязкостью ν и скоростью трения v_d . Фазочастотная область положительного действия (ФЧОПД) вязкоупругой границы, то есть область уменьшения порождения турбулентности, расположена выше расчетных кривых нейтрального действия. Ясно видно, что податливая граница не может управлять двумерными волновыми флуктуациями, распространяющимися в направлении основного течения ($k_z/k_x \approx 0$). Но данный результат моделирования не существен, поскольку такие флуктуации отсутствуют в пристенных турбулентных течениях. В этих расчетах необходимо рассматривать $k_z/k_x = 1$ как наиболее опасный, но реальный вариант.

3. Влияние продольного градиента давления на интерференционное действие вязкоупругой границы

В дополнение к изложенному во введении следует добавить, что при обтекании тел вращения, крыльев в носовой части всегда реализуется ламинарный пограничный слой, протяженность которого зависит от градиента давления. Было выполнено много успешных исследований [9] для поиска ламинаризованных обводов путем максимального продления конфузорной зоны.

Расчеты устойчивости ламинарного пограничного слоя на податливой поверхности, обтекаемой течением с продольным градиентом давления, свидетельствуют о возможном синергизме действия податливости поверхности и отрицательного градиента давления в повышении устойчивости ламинарного течения [10]. При этом достижимы результаты, представляющие практический интерес. Для дальнейшего продвижения в решении этой задачи нужны экспериментальные исследования.

Влияние продольного градиента давления на управление турбулентностью при использовании податливого покрытия пока систематически не исследовалось. Здесь приводятся первые расчетные результаты из работы [13]. Расчеты выполнены для

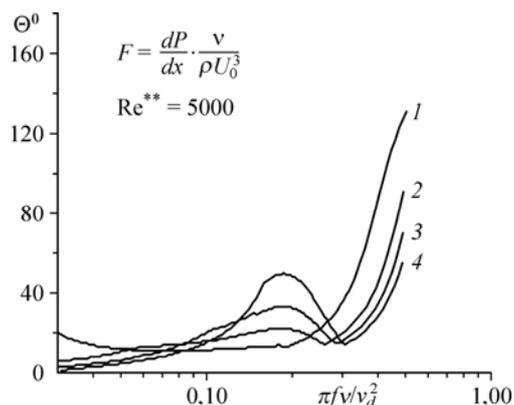


Рис. 4. Зависимость ФЧОПД для гладкой податливой поверхности от отрицательного продольного градиента давления.

$F = 0$ (1), $-5 \cdot 10^{-7}$ (2), -10^{-6} (3), $-1,5 \cdot 10^{-6}$ (4).

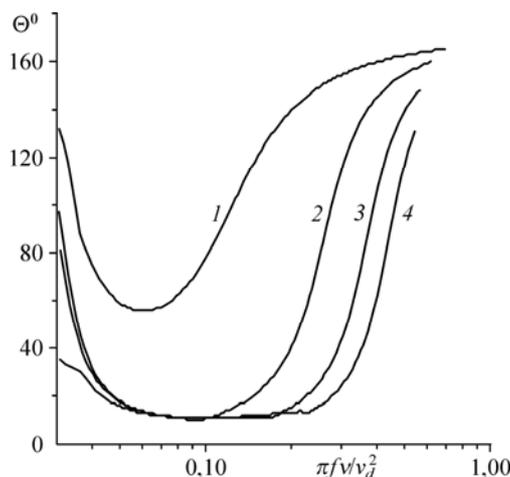


Рис. 5. Зависимость ФЧОПД для гладкой податливой поверхности от положительного продольного градиента давления.

$F = 5 \cdot 10^{-7}$ (1), $3,5 \cdot 10^{-7}$ (2), $2,5 \cdot 10^{-7}$ (3), 0 (4).

числа Рейнольдса $Re^{**} = 5000$, построенного по толщине потери импульса, при вариации параметра $F = \frac{dP}{dx} \frac{\nu}{\rho U_0^3}$.

На рис. 4 показаны фазочастотные области положительного действия вязкоупругой границы при отрицательном градиенте давления. Увеличение отрицательного градиента расширяет фазочастотную область положительного действия для высоких частот. Таким образом, в конфузурной области при недостаточности условий для ламинаризации течения можно ожидать более эффективного снижения турбулентного трения.

На рис. 5 показаны фазочастотные области положительного действия вязкоупругой границы при положительном градиенте давления (при условии отсутствия отрыва турбулентного пограничного слоя). Увеличение положительного градиента уменьшает фазочастотную область положительного действия. Важно, что в принципе сохраняется возможность снижения турбулентного трения при положительном продольном градиенте давления.

Заключение

Изложенное приводит к выводу о целесообразности продолжения расчетов, выполнения экспериментальных исследований течений с продольным градиентом давления и поиска ламинаризованных обводов при наличии податливых покрытий с целью минимизации гидродинамического сопротивления.

Список литературы

1. Современное состояние теории управления пограничным слоем / В.Б. Амфилохийев, Л.С. Артюшков, Б.А. Барбанель и др. СПб: ГУП СПМБМ "Малахит", 2000. 415 с.
2. Carpenter P.W., Pedley T.J. IUTAM Symp. on flow past highly compliant boundaries and in collapsible tubes. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2003. 323 p.
3. Романенко Е.В. Гидродинамика рыб и дельфинов. М.: Изд-во КМК, 2001. 411 с.
4. Prandtl L. Bemerkungen Ueber die Entstehung der Turbulenz // Z. Angew. Math. Mech. 1921. Bd 1. S. 431–436.
5. Sternberg J. A theory for viscous sublayer of a turbulent flow // J. Fluid Mech. 1962. Vol. 13, No. 2. P. 241–271.

6. **Schubert G., Corcos G.M.** The dynamics of turbulence near a wall according to a linear model // J. Fluid Mech. 1967. Vol. 29, No. 1. P. 113–135.
7. **Гольдштик М.А., Штерн В.Н.** Моногармоническая теория пристенной турбулентности // Турбулентные течения. М.: Наука, 1977. С. 102–110.
8. **Gad-el-Hak M.** Boundary layer interactions with compliant coatings: an overview // Appl. Mech. Rev. 1986. Vol. 39. P. 511–524.
9. **Шлихтинг Г.** Возникновение турбулентности. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 203 с.
10. **Басин А.М., Короткин А.И., Козлов Л.Ф.** Управление пограничным слоем судна. Л.: Судостроение, 1968. 492 с.
11. **Трифонов Г.Ф.** Теоретическое исследование влияния характеристик упругой границы на турбулентное течение // Влияние полимерных добавок и упругости поверхности на пристенную турбулентность. Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1978. С. 75–85.
12. **Хинце И.О.** Турбулентность. Ее механизм и теория. Москва: ГИФМЛ, 1963. 680 с.
13. **Семенов Б.Н., Семенова А.В.** Об интерференционном действии вязкоупругой границы на пристенную турбулентность // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9, № 3. С. 393–403.

*Статья поступила в редакцию 19 апреля 2012 г.,
после доработки — 16 сентября 2012 г.*