

УДК 532.591; 539.3.371

Особенности деформирования податливых покрытий, обладающих повышенной прочностью*

В.М. Кулик

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

E-mail: kulik@itp.nsc.ru

Проанализировано влияние модуля упругости материала покрытия на параметры деформации твердых податливых покрытий. Расчет, произведенный по двумерной модели, показал, что максимальная деформация покрытия достигается при отношении скорости течения U к параметру $C_t^0 = (E/3\rho)^{0,5}$, примерно равном 2,5, однако скорость движения поверхности стенки имеет первый локальный максимум при $U/C_t^0 \approx 1$. Определен диапазон значений параметров покрытия, при которых обеспечивается компромисс между его твердостью и интенсивностью взаимодействия с турбулентным течением. Для резиноподобных материалов с коэффициентом Пуассона около 0,5 отношение скорости потока к параметру C_t^0 должно быть в диапазоне 1÷1,5. Показано, что при таких параметрах среднеквадратичная величина прогиба поверхности покрытий меньше толщины вязкого подслоя, а ее отношение к длине волны очень мало и составляет $(1\div 5)\cdot 10^{-4}$. Такая форма деформированной поверхности кардинально отличается от параметров волновой стенки в экспериментах Кендалла, результаты которых используются для расчета обратного влияния деформации стенки на течение. Сделано предположение, что твердые податливые покрытия не вызывают нестабильности взаимодействия с обтекающим их течением.

Анализ скорости движения поверхности покрытия показал, что ее среднеквадратичное значение составляет 5÷6 % от величины динамической скорости течения при изменении модуля упругости материала покрытия в широком диапазоне (от 0,01 до 10 МПа). Это подтверждает ранее предложенный механизм снижения трения, основанный на изменении картины порождения рейнольдсовых напряжений вблизи податливой стенки. Проведенный анализ позволил объяснить сравнительно небольшое снижение сопротивления, полученное в экспериментах с твердыми податливыми покрытиями. Величина U/C_t^0 , реализуемая в этих исследованиях, составляла от 0,06 до 0,3, что много меньше оптимального значения.

Ключевые слова: податливое покрытие, турбулентное течение, двумерная модель расчета деформации, пульсации давления и скорости, оптимальные параметры.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 10-01-00174).

ВВЕДЕНИЕ

Идея снижения сопротивления трения с помощью податливых покрытий была подсмотрена Крамером у природы [1]. Пересекая Атлантический океан на лайнере, он наблюдал дельфинов, не отстававших от корабля. Поэтому первые покрытия имитировали шкуру дельфина и состояли из нескольких слоев [2]. В дальнейшем произошло упрощение конструкции и покрытия стали делать или из одного слоя вязкоупругого материала, или из слоя пористого материала, прикрытого сверху тонкой пленкой, например, полиэтилена. Это позволило широко варьировать свойства покрытия путем натяжения пленки в продольном и в поперечном направлениях, либо пропиткой поролона жидкостями различной вязкости (см. обзоры [3, 4]). Такие покрытия были хороши для лабораторных исследований, но совершенно не годились для практического использования.

Для создания прочных покрытий модуль упругости их материала должен быть не менее 1 МПа. Кроме этого, покрытие должно быть монолитным (как наиболее простая конструкция) с гладкой внешней поверхностью и иметь большую адгезию с основой. Деформация такого покрытия пристенными пульсациями давления оказывается очень маленькой, что необходимо учитывать при описании его взаимодействия с потоком.

В работе [5] использована двумерная модель деформации вязкоупругого покрытия бегущей волной давления. Проанализированы различные типы неустойчивостей, возникающие при взаимодействии покрытия с потоком. В работе [6] турбулентный поток аппроксимирован как потенциальное течение с наложенным цугом пульсаций давления, имитирующим взрывной процесс в пограничном слое. В работе определены области параметров, где течение над податливой поверхностью неустойчиво, а также область стабильно устойчивого взаимодействия.

В настоящей статье в главе I приведен обзор работ, описывающих деформацию податливых покрытий. В главе II проанализированы особенности деформирования вязкоупругих покрытий, связанных с малостью этих деформаций.

I. ДЕФОРМАЦИЯ ВЯЗКОУПРУГОГО ПОКРЫТИЯ

На податливых покрытиях реализуется следующий сценарий деформации их поверхности:

- 1) вихревые структуры, движущиеся с потоком, создают пульсации давления на стенке;
- 2) пульсации давления деформируют покрытие, создавая выгибы и прогибы;
- 3) основное течение создает добавочное распределение давления на деформированной поверхности покрытия;
- 4) это вторичное давление может вносить добавочное изменение в картину деформации покрытия, вызывая различные неустойчивости. Возникающий в результате неустойчивостей волнистый изгиб поверхности некоррелирован с турбулентными пульсациями и обычно вызывает рост сопротивления. Отсюда следует необходимость избегать “опасных” режимов взаимодействия покрытия с потоком, при которых возникают гидроупругие неустойчивости.

Рассмотрим теперь эти этапы подробнее.

1. Влияние структуры потока

Поскольку покрытие обладает определенной инерционностью, то для того, чтобы создать волновую деформацию его поверхности определенной амплитуды, необходимо некоторое время, называемое временем установления вынужденных

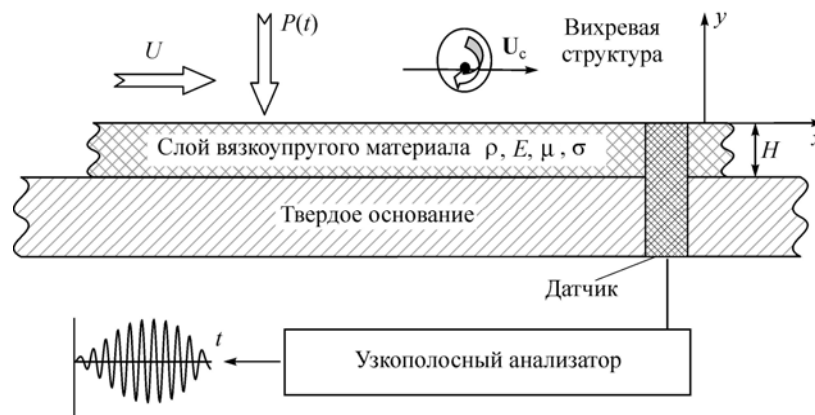


Рис. 1. Схема податливого покрытия и воздействия, оказываемые на него течением.

колебаний (для статических деформаций оно обычно называется временем релаксации). В работе [7] в рамках одномерной модели покрытия исследован переходной режим установления вынужденных колебаний. Показано, что на частоте первого резонанса покрытия сдвиг фаз между деформацией и давлением успевает принять стационарное значение за один период колебания независимо от коэффициента потерь материала покрытия. Процесс установления амплитуды сильно зависит от коэффициента потерь. Так, если для $\mu = 0,1$ требуется около 10 периодов колебаний для достижения уровня 0,7 от заданного, то при $\mu > 0,4$ это время становится меньше одного периода.

Если бы пульсации давления были совершенно хаотичны, то покрытие не успевало бы реагировать на приложенное поле давлений и его реакция была бы близка к нулю.

На рис. 1 показано, что при прохождении вихревой структуры мимо точки наблюдения генерируемые ею на стенке пульсации давления будут когерентны в течении некоторого отрезка времени [8, 9].

По-видимому, в различных потоках с одинаковой средней скоростью одно и то же покрытие будет работать по-разному. Потоки могут различаться не только по уровню турбулентности и спектральному составу гармоник, но и по длительности их когерентного действия. Главное требование для эффективного взаимодействия покрытия с потоком — пульсации давления в области резонансной частоты покрытия должны быть когерентны в течении отрезка времени, не меньшего времени установления вынужденных колебаний.

2. Деформация покрытия бегущей волной давления

Дальнейший анализ работы податливых покрытий будет проводиться при условии, что внешнее воздействие имеет достаточно большую длительность когерентного действия. В теоретических исследованиях обычно исследуется реакция покрытия на стационарную бегущую волну давления [5, 10–13]

$$P(t) = P_0 e^{ik(x-U_c t)},$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, а U_c — конвективная скорость волны давления. При описании деформации податливого покрытия должны быть освещены следующие вопросы:

- определена скорость распространения свободных колебаний в покрытии — V ;
- рассчитаны параметры вынужденных колебаний;

- описан переходной процесс установления вынужденных колебаний;
- исследована устойчивость.

Скорость распространения свободных колебаний

Различные аспекты определения скорости деформационной волны приведены в работах [5, 12]. Смещение частиц среды определяется зависимостью

$$\xi = i\zeta + j\eta = f(y)e^{i\alpha(x/V-t)},$$

здесь ζ , η — компоненты смещения, направленные соответственно вдоль покрытия и перпендикулярно ему. Общее уравнение движения имеет вид [14]:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = C_l^2 \Delta \xi + (C_l^2 - C_t^2) \text{grad div } \xi,$$

где $C_l = \left[\frac{E^*(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)} \right]^{1/2}$ — скорость волны сжатия-растяжения в безгранич-

ном пространстве, $E^* = E(1-i\mu)$, $C_t = \left[\frac{E^*}{2\rho(1+\sigma)} \right]^{1/2}$ — скорость сдвиговой волны в безграничном пространстве.

Граничными условиями являются условие отсутствия смещения на твердой стенке:

$$\zeta = \eta = 0 \quad \text{при } y = H,$$

и отсутствие напряжений на внешней границе:

$$C_l^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} + (C_l^2 - 2C_t^2) \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad \text{при } y = 0.$$

Для расчета скорости распространения гармонических возмущений решается характеристическое уравнение

$$\begin{aligned} & [4 + (1 + \beta^2)^2] \cosh(2\pi\alpha H / \lambda) \cosh(2\pi\beta H / \lambda) - \\ & - [4\alpha\beta + (1 + \beta^2)^2 / \alpha\beta] \sinh(2\pi\alpha H / \lambda) \sinh(2\pi\beta H / \lambda) + \\ & + \frac{\rho_0}{\rho} K \left(\frac{U_c - V}{C_t} \right)^2 e^{\Theta} (\beta^2 - 1) \left[\frac{\cosh(2\pi\alpha H / \lambda) \sinh(2\pi\beta H / \lambda)}{\beta} - \right. \\ & \left. - \alpha \cosh(2\pi\beta H / \lambda) \sinh(2\pi\alpha H / \lambda) \right] - 4(1 + \beta^2) = 0, \end{aligned}$$

где $\alpha = \left[1 - \left(\frac{V}{C_t} \right)^2 \frac{1-2\sigma}{2(1-\sigma)} \right]^{0,5}$, $\beta = \left[1 - \left(\frac{V}{C_t} \right)^2 \right]^{0,5}$, $\lambda = 2\pi V / \omega$ — длина волны.

Третий член в этой формуле учитывает влияние взаимодействия покрытия с внешней средой, имеющей плотность ρ_0 . Параметры, описывающие это взаимодействие (K , Θ), будут описаны далее в главе I, раздел 3.

Предложенная двумерная методика расчета показывает, что существует множество мод колебаний, скорость распространения которых показана на рис. 2,

Рис. 2. Дисперсионные зависимости скорости распространения возмущений в покрытии от номера моды колебаний.

но наиболее важной является первая мода, имеющая наименьшую скорость распространения. Поэтому все дальнейшее относится к первой моде, которая фактически и реализуется на практике.

Параметры вынужденных колебаний

Вынужденные колебания податливо-го покрытия бегущей волной давления рассчитаны в работе [13]. В этом случае используется равенство напряжений на внешней границе:

$$C_t^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} + (C_t^2 - 2C_t^2) \frac{\partial \zeta}{\partial x} = -\frac{P}{\rho} e^{i\omega(x/V-t)}, \quad \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad \text{при } y = 0.$$

Комплексная податливость имеет 2 компоненты — перпендикулярную к поверхности $C_n = |C_n| e^{i\theta_n}$ и параллельную ей $C_p = |C_p| e^{i\theta_p}$.

$$C_n^* = \frac{C_n}{H/E} = \frac{\lambda}{H} \left(\frac{V}{C_t^0} \right)^2 \frac{2(1+\sigma)\alpha F}{4\pi(1-i\mu)^2 \left[2 - \frac{(V/C_t^0)^2}{1-i\mu} - 2S \right]},$$

$$C_p^* = \frac{C_p}{H/E} = \frac{\lambda}{H} \frac{i(1+\sigma)(S-1)}{\pi(1-i\mu) \left[2 - \frac{(V/C_t^0)^2}{1-i\mu} - 2S \right]}$$

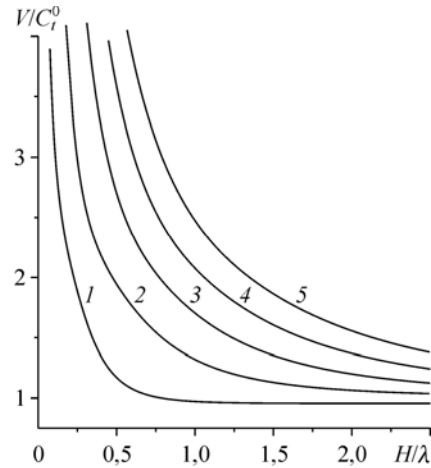
где

$$S = \frac{ch(2\pi\alpha H/\lambda) - \alpha\beta DF}{ch(2\pi\beta H/\lambda)}, \quad D = sh(2\pi\beta H/\lambda) - \frac{1+\beta^2}{2\alpha\beta} sh(2\pi\alpha H/\lambda),$$

$$F = \frac{sh(2\pi\alpha H/\lambda) - \frac{1}{\alpha\beta} ch(2\pi\alpha H/\lambda) th(2\pi\beta H/\lambda)}{ch(2\pi\beta H/\lambda) - \frac{1+\beta^2}{2} ch(2\pi\alpha H/\lambda) - D th(2\pi\beta H/\lambda)}, \quad C_t^0 = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}}.$$

На рис. 3 показана величина $|C_n^*|$ — компоненты нормальной податливости, нормированной на величину H/E , равной податливости тонкого стержня высотой H .

В работе [15] предложен метод экспериментального определения частотной зависимости вертикальной компоненты комплексной податливости. Измеренная резонансная частота покрытия хорошо совпала с расчетным значением [16]. Максимальная податливость достигается при соотношении диаметра контактной площадки вибратора d к толщине покрытия H , равном $d/H \approx 1,5$, что соответствует $\lambda/H \approx 3$.



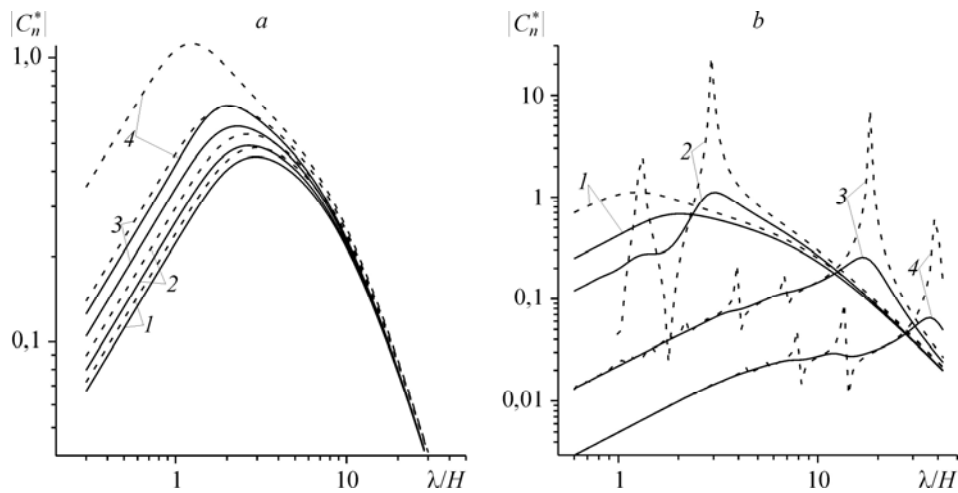


Рис. 3. Зависимость нормальной компоненты безразмерной податливости от длины волны. Кривые: $V/C_t^0 = 0,1$ (1), 0,5 (2), 0,75 (3), 0,9 (4) — а, $V/C_t^0 = 1,2$ (1), 1,52 (2), 5 (3), 10 (4) — б. Линии при $\mu = 0,4$ (сплошные), 0,0125 (штриховые).

В работе [17] исследовалось взаимодействие покрытия с плоской волной давления, генерируемой с заданной частотой в водном потоке. Результаты показали, что максимальное взаимодействие наблюдается при $\lambda/H = 3,5-4$.

Переходной процесс

Переходной процесс установления вынужденных колебаний исследован в [18] с использованием одномерной модели покрытия. В работе [6] проведен расчет деформации покрытия по двумерной модели для одиночного импульса давления, форма которого моделирует взрывной процесс (burst) в пограничном слое.

Устойчивость

Устойчивость деформационных возмущений, возникающих при взаимодействии податливого покрытия с обтекающим его потоком, является неисчерпаемой темой исследований, начиная с работ Крамера [19] и до сегодняшних дней [20, 21]. В работах [10] и [11] возникающие неустойчивости разделены на 3 типа: класс А — модифицированное влияние податливой поверхности на волны Толлмина–Шлихтинга, класс В — флаттер, и С — резонансные возмущения, связанные с неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца. На рис. 4 приведена их классификация согласно работе [4]. Основное внимание было обращено на неустойчивости классов А [22]

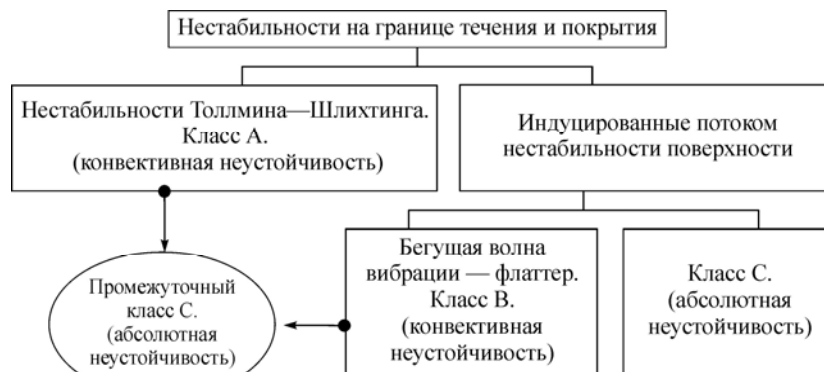


Рис. 4. Классификация неустойчивостей.

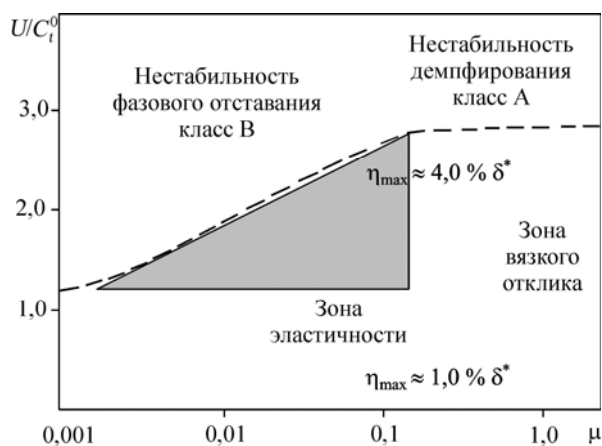


Рис. 5. Область стабильного деформирования податливого покрытия.

и В [23]. Эти неустойчивости ярко проявляются в мягких покрытиях, амплитуда деформации которых весьма значительна. Так, в работе [24] отношение амплитуды деформации к толщине покрытия росло от 0,2 до $\sim 0,45$ при изменении U/C_t^0 от 7 до 20 (где U — скорость потока).

В работе [6] приведен суммарный график влияния неустойчивостей, показанный на рис. 5. Здесь выполнен пересчет горизонтальной координаты (у Данкана использовался параметр damping ratio, равный $(\mu/2\pi)(\lambda/H)$) в реально измеряемый коэффициент потерь материала покрытия. Для резонансной частоты $\lambda \approx 3H$ параметр damping ratio равен $\mu(3/2\pi)$.

Расчет [6] выполнен при $\rho/\rho_0 = 1$ и при $C_t/C_t^0 = 70$. Поскольку $C_t = C_t^0 \sqrt{2(1-\sigma)/(1-2\sigma)}$, то это означает, что $\sigma = 0,4999$. Так как реальные резиноподобные материалы имеют $\sigma = 0,47 \div 0,49$, то выбранное Данканом ограничение $C_t/C_t^0 = 70$ относится к описанию деформаций покрытий, изготовленных из идеального материала. Выделенная на рисунке рекомендуемая область параметров $(U/C_t^0, \mu)$ ограничена сверху неустойчивостями классов А и В. С уменьшением вязких потерь материала покрытия скорость устойчивого режима течения уменьшается до $U/C_t^0 \sim 1,2$, величина деформации покрытия может достигать 1 % толщины пограничного слоя, а скорость распространения возмущений $\sim C_t^0$.

При больших вязких потерях $\mu > 0,2$ неустойчивость класса А ограничивает допустимую скорость потока на уровне $U/C_t^0 = 2,86$. При заданной скорости потока это ограничение задает минимально допустимый модуль упругости материала покрытия и максимально допустимый уровень деформации покрытия на уровне 4 % толщины пограничного слоя.

Неустойчивости класса В сильнее проявляются на малых вязких потерях, поскольку с ростом μ свободные волны в материале сильно затухают, как показано в работе [12] (при $\mu = 0,1$ на расстоянии равном длине волны они затухают в e раз). При малых значениях U/C_t^0 уменьшается взаимодействие покрытия с потоком из-за уменьшения податливости покрытия (см. рис. 3) и соответственно влияние неустойчивости класса В.

3. Добавочное давление на деформированной поверхности

Во всех теоретических работах давление от волнистости поверхности записывалось в виде

$$P = -K\rho \frac{2\pi a}{\lambda} (U - V)^2 e^{i[\theta + \frac{2\pi}{\lambda}(x - Vt)]}, \quad (1)$$

где a и λ — амплитуда и длина волны деформации, Θ — сдвиг фаз между деформацией и давлением.

Численный коэффициент K и фазовый сдвиг Θ в [6] взяты из работы [25], где были экспериментально определены параметры течения над механически деформируемой стенкой. Стенка генерировала 12 периодов бегущей синусоидальной волны деформации с $a/\lambda = 0,03$ ($\lambda = 10,16$ см) и с волновой скоростью $V = 0,3 \div 3$ м/с.

II. ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПРОЧНОГО ПОКРЫТИЯ

Выбор модуля упругости для заданной скорости

При выборе свойств податливого покрытия нужно обеспечить его максимальную податливость при сохранении как можно большей прочности. Это создаст противоречивые требования к модулю упругости материала покрытия.

При экспериментах с мягкими податливыми покрытиями, имеющими низкий модуль упругости, параметр V/C_t^0 , где $C_t^0 = \sqrt{E/3\rho}$ для резиноподобных материалов с коэффициентом Пуассона $\sigma \approx 0,5$, варьировался в очень широких пределах и достигал 3,32 в работе [26] и даже 20 в [24].

Податливость покрытия при $V/C_t^0 < 1$ имеет куполообразную форму, как показано на рис. 3, а. Далее с ростом скорости частотная характеристика приобретает колебательный характер. Наибольший пик податливости наблюдается при $V/C_t^0 = 1,52$ и $\lambda/H \approx 3$ (см. рис. 3, б). При дальнейшем росте скорости податливость убывает.

Среднеквадратичное значение прогиба поверхности турбулентными пульсациями давления, определенное во всей полосе частот по методике, описанной в работе [27], приведено на рис. 6, а. Для расчета величины деформации использован энергетический спектр пульсаций давления $P(\omega)$ [28], полученный экстраполяцией экспериментально измеренных спектров датчиками с различным диаметром чувствительной поверхности, при устремлении диаметра датчика к нулю:

$$\frac{P(\omega)U}{\tau_w \delta^*} = \frac{70}{1 + \exp(3,9(f\delta^*/U)^{0,62})},$$

здесь $\delta^* = \nu \exp(0,41V/U_\tau - 2,1)/8U_\tau$ — толщина вытеснения, $U_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ — динамическая скорость, $\tau_w = 0,03\rho U^2 (U/\nu)^{-1/5}$ — касательное трение на стенке. Эта формула имеет универсальный характер, поскольку пригодна как для водных, так и для воздушных потоков, по крайней мере, до значений $f\delta^*/V = 3$. С изменением модуля упругости в тысячу раз (с 0,1 до 100 МПа) величина деформации изменится не более чем в три раза при одинаковых значениях U/C_t^0 . Максимальная деформация наблюдается при $U/C_t^0 \approx 2,2$ с последующим резким спадом.

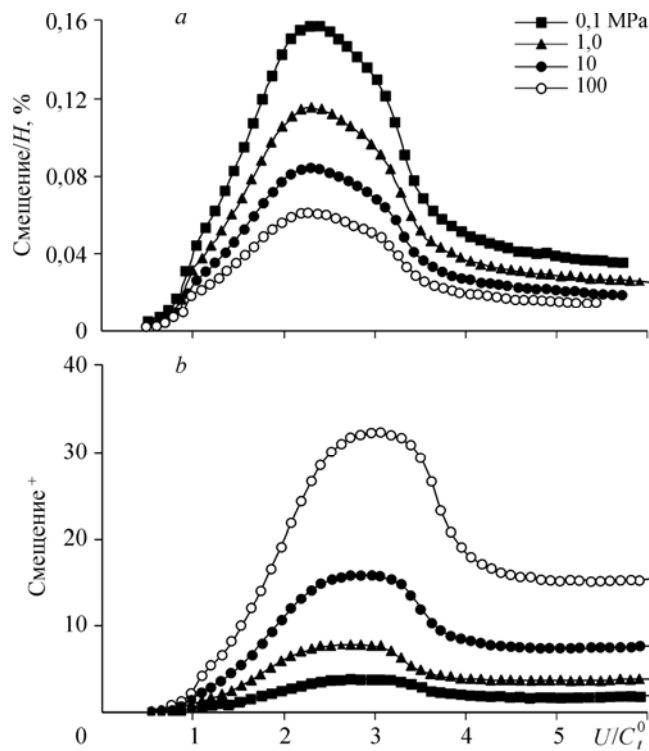


Рис. 6. Зависимость относительного среднеквадратичного вертикального смещения поверхности покрытия от скорости течения при различных жесткостях покрытия. Деформация нормирована: *a* — на толщину покрытия, *b* — пристенными переменными; $H = 5$ мм, $\sigma = 0,5$, $\mu = 0,1$.

Для обеспечения прочности покрытия модуль упругости должен быть максимально возможным. Это приводит к тому, что значение U/C_t^0 не должно быть большим. Как следует из рис. 6, *a*, разумно ограничиться величиной $U/C_t^0 < 3$, включающей в себя область основного резонанса податливости.

Гидродинамическая гладкость покрытия

Согласно оценке [6] (см. рис. 5), устойчивое взаимодействие покрытия с потоком при реальном диапазоне изменения коэффициента вязких потерь $0,005 < \mu < 0,2$ реализуется при $U/C_t^0 < 2,86$. Отметим, что это условие практически совпадает с условием компромисса между податливостью и прочностью покрытия. Очень важным фактом является то, что оба эти условия не зависят от толщины покрытия. В качестве примера рассмотрим однослойное покрытие из однородного материала с плотностью $\rho = 10^3$ кг/м³, коэффициентом Пуассона $\sigma \approx 0,5$ и модулем упругости $E = 1$ МПа. Удовлетворение условия $U/C_t^0 < 2,86$ означает, что покрытие будет работать в зоне, свободной от нестабильностей до скорости $U = 52$ м/с и при этом будет выполняться условие максимального взаимодействия покрытия с потоком.

Среднеквадратичная величина продольной и поперечной компонент деформации для твердого податливого покрытия очень мала. Безразмерная величина нормального смещения соответствует:

$$\text{смещение}^+ = \text{среднеквадратичное смещение} \times U_\tau / \nu,$$

где U_τ — динамическая скорость, ν — кинематическая вязкость (см. рис. 6, b). До модуля упругости материала покрытия $E < 10$ МПа (при $H = 5$ мм) оно меньше, чем толщина вязкого подслоя. Поэтому такие покрытия будут гидродинамически гладкими, т. е. не внесут добавочного сопротивления трения из-за шероховатости их поверхности [29]. При $E > 10$ МПа гладкость покрытия может быть легко достигнута уменьшением его толщины.

Форма деформированной поверхности покрытия кардинально отличается от рельефа классической шероховатости — песочной шероховатости Никурадзе. Так, в случае песочной шероховатости вертикальные и продольные размеры единичного элемента шероховатости примерно равны. В случае же податливых покрытий продольным размером элемента шероховатости является длина волны деформации, которая равна утроенной толщине покрытия в случае максимального взаимодействия покрытия с потоком [12]. Вертикальный размер элемента шероховатости — η_{rms} может быть оценен среднеквадратичным значением прогиба поверхности, показанным на рис. 6, a.

$$\frac{\text{вертикальный размер}}{\text{продольный размер}} = \frac{\eta_{rms}}{\lambda} \approx \frac{\eta_{rms}}{3H} = (1-5) \cdot 10^{-4}.$$

Для сравнения такое малое отношение можно представить как амплитуду волны в 1 мм на длине 10 м.

Полученная величина отношения вертикального размера шероховатости к длине волны на два порядка меньше значения, использованного в эксперименте [25]. К сожалению, нет экспериментальных данных о значениях K и Θ при таких малых амплитудах деформации. Можно предположить, что в этом случае (при амплитуде деформации в несколько единиц вязкого масштаба и чрезвычайно пологих неровностях поверхности) параметры K и Θ будут значительно меньше использованных в работе [6], а добавочное давление (1), инициированное неровностями покрытия, будет пренебрежимо мало по сравнению с турбулентными пульсациями давления.

Влияние песочной шероховатости на параметры турбулентного пограничного слоя сильно уменьшается, когда шероховатость становится меньше толщины вязкого подслоя, а при размере шероховатости меньшей 5 единиц вязкого масштаба она вообще не проявляется [29]. Суммируя все приведенные аргументы, можно полагать, что влияние амплитуды деформации поверхности твердого податливого покрытия никак не сказывается на параметрах турбулентного течения над ним.

Выбор оптимальных параметров

Для увеличения прочности покрытия нужно увеличивать модуль упругости его материала. Проанализируем, как это влияет на интенсивность взаимодействия покрытия с потоком. В работе [30] показано, что максимальная интенсивность взаимодействия определяется двумя условиями:

– пространственный фактор: длина волны пульсационного давления равна длине волны свободных колебаний, распространяющихся в покрытии. Это означает, что конвективная скорость потока равна скорости распространения возмущений в покрытии — $(0,7 \div 0,9)U = V$;

– временной фактор: резонансная частота покрытия f_0 должна быть в диапазоне [31]

$$6,67 \times 10^{-3} < \frac{f_0 V}{U_\tau^2} < 2,00 \times 10^{-2},$$

Таблица

Резонансная частота покрытия f_0 и скорость распространения деформаций на резонансной частоте V_0 для покрытия толщиной $H = 3$ мм, изготовленного из материала с $\rho = 10^3$ кг/м³ и $\mu = 0,5$, а также спектральная плотность пульсаций давления P_ω на этих параметрах

E , МПа	0,001	0,01	0,1	1	10	100
f_0 , Гц	98,7	312	987	3121	9 870	31 210
V_0 , м/с	0,895	2,83	8,95	28,3	89,5	283
P_ω , Па ² с	0,154	2,92	53,9	968	17 100	295 000

что также совпадает с гипотезой [32] о демпфировании турбулентных выбросов податливым покрытием.

Увеличение модуля упругости, как показано в таблице, приводит к росту резонансной частоты покрытия ($f_0 \sim \sqrt{E}$) и скорости распространения деформаций на резонансной частоте V_0 ($V_0 \sim \sqrt{E}$), где $f_0 = (0,357 + 0,312\sigma) C_t^0 / H$, $V_0 = (2,826 - 4,5\sigma + 3,9\sigma^2)$.

С увеличением прочности покрытия его податливость уменьшается обратно пропорционально модулю упругости ($C_n \sim 1/E$), что приводит к уменьшению его деформации. Скорость движения поверхности покрытия на резонансной частоте $v_{\text{покр}} \sim 2\pi f_0 \eta \sim P_\omega / \sqrt{E}$ (здесь P_ω — спектральная плотность пульсаций давления, определенная согласно работе [28]). Поскольку, как видно из таблицы, $P_\omega \sim E$, то скорость движения поверхности покрытия увеличивается с ростом модуля упругости материала как \sqrt{E} .

На рис. 7 приведено среднеквадратичное значение безразмерной скорости движения поверхности покрытия $v^+ = v_{rms} / U_\tau$, определенное во всей полосе частот [27]. С ростом модуля упругости на 3 порядка (с 0,01 до 10 МПа), параметр v_{rms} изменяется незначительно (убывает с 6 до 5 % от величины динамической скорости при $U / C_t^0 \approx 1$).

Механизм снижения трения

Поглощение энергии турбулентности податливым покрытием было в основе первых теорий, объясняющих снижение турбулентного трения или затягивание ламинарно-турбулентного перехода [2, 33]. На рис. 8 показано, что отношение

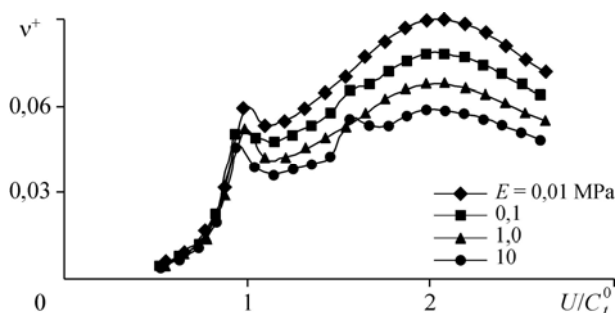


Рис. 7. Зависимость среднеквадратичного значения безразмерной скорости вертикального движения поверхности покрытия от скорости течения при различных жесткостях покрытия.

$$H = 5 \text{ мм}, \sigma = 0,5, \mu = 0,1.$$

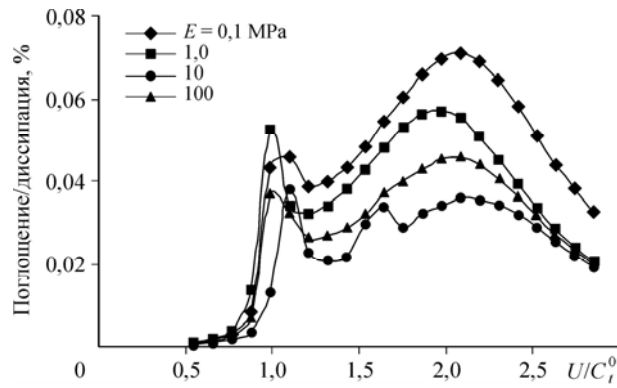
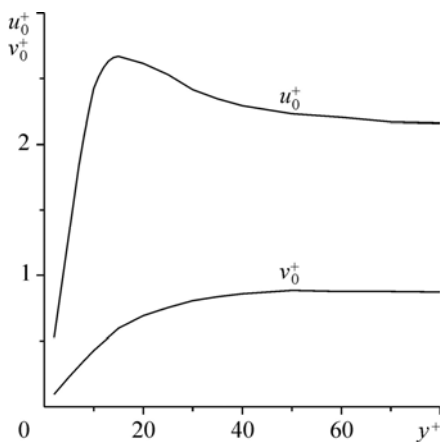


Рис. 8. Отношение энергии, рассеянной внутри покрытия, к вязким потерям движущей среды при различных жесткостях покрытия.
 $H = 5$ мм, $\sigma = 0,3$, $\mu = 0,05$.

поглощенной покрытием энергии к рассеянной на его поверхности составляет около 10^{-4} для случая турбулентного течения над прочным податливым покрытием. Поэтому поглощение энергии в покрытии не может быть причиной влияния покрытия на характеристики турбулентного пограничного слоя.

Вычисление нормальной и продольной компонент скорости движения поверхности покрытия позволило уточнить предложенный в работах [31, 34] механизм действия покрытий, основанный на изменении напряжений Рейнольдса вблизи стенки. Рейнольдсово напряжение есть корреляция пульсаций скорости течения, направленных вдоль и поперек потока $\tau = \rho_0 \left\langle (u_0 + u^*) (v_0 + v^*) \right\rangle$, где u_0 и v_0 — продольная и нормальная компоненты пульсаций скорости невозмущенного течения, u^* и v^* — возмущения, вносимые покрытием.

Поведение безразмерных значений u_0/U_τ и v_0/U_τ показано на рис. 9. Скорость пульсаций равна нулю на стенке, а на $y^+ = 15$ величина u_0 достигает максимального значения ($u_0 = 2,7U_\tau$). Величина v_0 при $y^+ > 40$ примерно равна динамической скорости.



Поскольку безразмерная скорость движения поверхности покрытия при $U/C_t^0 = 1$ составляет 5–6 % от динамической скорости (см. рис. 7), то в области вблизи стенки u^* и v^* могут даже превышать u_0 и v_0 . Это показывает, что взаимодействие твердого покрытия с потоком происходит в узком слое у стенки, составляющим несколько единиц вязкого масштаба.

Рис. 9. Профили: продольной — u_0 и нормальной к поверхности — v_0 компонент пульсационной скорости в пограничном слое около твердой поверхности.

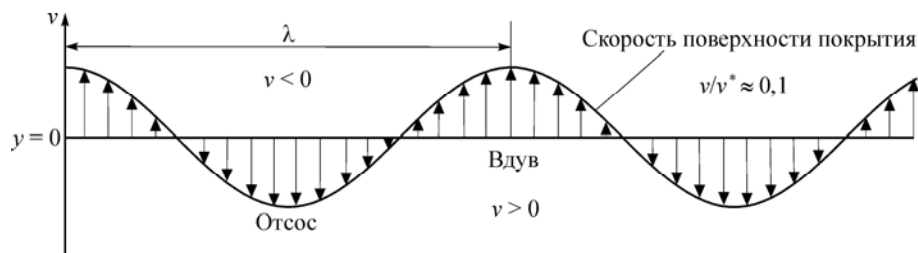


Рис. 10. Аналогия работы податливого покрытия с методом “вдув–отсос”.

Механизм взаимодействия податливого покрытия с течением может быть проиллюстрирован аналогией с хорошо известным методом снижения сопротивления вдувом-отсосом среды через обтекаемую потоком поверхность (рис. 10). Стрелки определяют величину и направление скорости движения поверхности податливого покрытия. Области с $v > 0$ интерпретируются как зона вдува, а области, где $v < 0$, — как отсос.

ВЫВОДЫ

Параметры деформации прочных податливых покрытий рассчитаны по двумерной модели. Максимальная деформация покрытия достигается при отношении скорости течения U к параметру $C_t^0 = (E/3\rho)^{0,5}$ примерно равном 2,5, однако скорость движения поверхности стенки имеет первый локальный максимум при $U/C_t^0 \approx 1$.

Требование прочности покрытия и достижение максимальной интенсивности его взаимодействия с турбулентным течением выдвигают противоположные требования к модулю упругости материала покрытия. Определен диапазон значений параметров покрытия, при которых обеспечивается компромисс. Для резиноподобных материалов с коэффициентом Пуассона около 0,5 отношение скорости потока к параметру C_t^0 должно быть в диапазоне 1÷1,5. При таких параметрах твердые податливые покрытия с $E > 1$ МПа остаются гидродинамически гладкими, поскольку среднеквадратичная величина прогиба их поверхности меньше толщины вязкого подслоя, а ее отношение к длине волны очень мало и составляет $(1\div 5) \cdot 10^{-4}$.

Форма деформированной поверхности кардинально отличается и от рельефа песочной шероховатости, рассматриваемой в работе [29], и от параметров волновой стенки в экспериментах [25], результаты которых взяты для расчета обратного влияния деформации стенки на течение [5, 6]. Так как параметры деформации волновой стенки Кендалла [25] примерно в 100 раз превышают деформацию прочных податливых покрытий, то сделано предположение, что прочные податливые покрытия не вызывают нестабильности взаимодействия с обтекающим их потоком.

Среднеквадратичное значение скорости движения поверхности покрытия, определенное во всей полосе частот, составляет 5÷6 % от величины динамической скорости течения при изменении модуля упругости материала покрытия в широком диапазоне (от 0,01 до 10 МПа). Это подтверждает ранее предложенный механизм снижения трения, основанный на изменении картины порождения рейнольдсовых напряжений вблизи податливой стенки.

Анализ применения прочных податливых покрытий позволяет объяснить сравнительно небольшое снижение сопротивления, полученное в работах [35–37]. Величина U/C_t^0 , реализуемая в этих исследованиях, составляла от 0,06 до 0,3, что находится далеко от оптимального значения $U/C_t^0 \approx 1 \div 1,5$, где покрытия с $\sigma \approx 0,5$ взаимодействуют с потоком максимальным образом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kramer M.O.** The dolphin's secret // J. Am. Soc. Nav. Engr. 1961. Vol. 73. P. 103–107.
2. **Kramer M.O.** Boundary layer stabilization by distributed damping // J. Am. Soc. Nav. Engr. 1962. Vol. 74. P. 341–348.
3. **Bushnell D.M., Hefner J.N., Ash R.L.** Effect of compliant wall motion on turbulent boundary layers // Phys. Fluids. 1977. Vol. 20, No. 10, part 2. P. S31–S48.
4. **Gad-el-Hak M.** Drag reduction using compliant walls // Fluid mechanics and its applications, Vol. 72. Flow past highly compliant boundaries and in collapsible tubes / Eds. Carpenter P.W. and Pedley T.J. Kluwer Acad. Publ., 2003. P. 191–229.
5. **Duncan J.H., Waxman A.M., Tulin M.P.** The dynamics of waves at the interface between a viscoelastic coating and a fluid flow // J. Fluid Mech. 1985. Vol. 158. P. 177.
6. **Duncan J.H.** The response of an incompressible, viscoelastic coating to pressure fluctuations in a turbulent boundary layer // J. Fluid Mech. 1986. Vol. 171. P. 339–363.
7. **Кулик В.М., Морозова С.Л.** Отклик податливого покрытия на турбулентные пульсации давления // Теплофизика и аэродинамика. 2001. Т. 8, № 1. С. 59–75.
8. **Russell S.J.** Measured wall pressure signatures of turbulence producing structures // Proc. Int. Symp. Sea-water Drag Reduction, Newport, 1998. P. 63–71.
9. **Willmarth W.W.** Structure of turbulence in boundary layers // Adv. Appl. Mech. 1975. Vol. 15. P. 159–254.
10. **Landahl M.T.** On the stability of laminar incompressible boundary layer over a flexible surface // J. Fluid Mech. 1962. Vol. 13. P. 609–632.
11. **Benjamin T.B.** The threefold classification of unstable disturbances in flexible surfaces bounding inviscid flows // J. Fluid Mech. 1963. Vol. 16. P. 436–450.
12. **Кулик В.М.** Плоская волна деформации в изотропном слое вязкоупругого материала // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 3. С. 104–111.
13. **Кулик В.М.** Вынужденные колебания слоя вязкоупругого материала под действием конвективной волны давления // ПМТФ. 2007. Т. 48, № 2. С. 90–97.
14. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теория упругости. М.: Наука, 1987. С. 248.
15. **Кулик В.М., Морозова С.Л., Родякин С.В.** Измерение комплексной податливости покрытий из эластичных материалов // ИФЖ. 2002. Т. 75, № 2. С. 108–111.
16. **Кулик В.М., Родякин С.В.** Сравнение расчета и результатов измерения колебательных характеристик податливых покрытий // ИФЖ. 2003. Т. 76, № 1. С. 159–163.
17. **Hansen R.J., Hunston D.L.** Fluid-property effects on flow-generated waves on a flexible surface // J. Fluid Mech. 1983. Vol. 133. P. 161–177.
18. **Кулик В.М., Кулик Л.В., Морозова С.Л.** Переходной режим установления вынужденных колебаний однослойного покрытия из вязкоупругого материала // ИФЖ. 1998. Т. 71, № 4. С. 652–656.
19. **Kramer M.O.** Boundary layer stabilization by distributed damping // J. Amer. Soc. Naval Engr. 1960. Vol. 72. P. 25–33.
20. **Реутов В.П., Рыбушкина Г.В.** Генерация нелинейных волн на вязкоупругом покрытии в турбулентном пограничном слое // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 6. С. 50–59.
21. **Yeo K.S., Zhao H.Z., Khoo B.C.** Turbulent boundary layer over a compliant surface – absolute and convective // J. Fluid Mech. 2001. Vol. 449. P. 141–168.
22. **Carpenter P.W., Garrad A.D.** The hydrodynamic stability of flow over Kramer-type compliant surfaces. Part I. Tollmien-Schlichting instabilities // J. Fluid Mech. 1985. Vol. 155. P. 465–510.
23. **Carpenter P.W., Garrad A.D.** The hydrodynamic stability of flow over Kramer-type compliant surfaces. Part II. Flow-induced surface instabilities // J. Fluid Mech. 1986. Vol. 170. P. 199–232.
24. **Gad-el-Hak M., Blackwelder R.F., Riley J.J.** On the interaction of compliant coatings with boundary layer flows // J. Fluid Mech. 1984. Vol. 140. P. 257–280.
25. **Kendall J.M.** The turbulent boundary layer over a wall with progressive surface waves // J. Fluid Mech. 1970. Vol. 41, part 2. P. 259–281.
26. **Lee T., Fisher M. and Schwarz W.H.** Investigation of the stable interaction of a passive compliant surface with a turbulent boundary layer // J. Fluid Mech. 1993. Vol. 257. P. 373–401.
27. **Кулик В.М.** Деформация вязкоупругого покрытия в турбулентном течении // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 1. С. 43–56.

28. Блюдзе Ю.Г., Докучаев О.Н. Измерение пульсаций скорости и давления в турбулентных пограничных слоях // Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа. 1969. № 5. С. 175–182.
29. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
30. Kulik V. M., Lee I. and Chun H. H. Wave properties of coating for skin friction reduction // Phys. Fluids. 2008. Vol. 20, No. 7. P. 075109–075110.
31. Семенов Б.Н. Методология выбора однослойных податливых покрытий для снижения турбулентного трения // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 2. С. 231–241.
32. Bushnell D.M., Hefner J.N., Ash R.L. Effect of compliant wall motion on turbulent boundary layers // Phys. Fluids. 1977. Vol. 20, No. 10, part II. P. S31–S48.
33. Козлов Л.Ф., Цыганюк А.И., Бабенко В.В., Никишова О.Д., Воропаев Г.А. Формирование турбулентности в сдвиговых течениях. Киев: Наукова думка, 1985. 284 с.
34. Семёнов Б.Н. Об интерференционной форме взаимодействия вязкоупругой границы на пристенную турбулентность // Влияние полимерных добавок и упругости поверхности на пристенную турбулентность. Новосибирск: Наука, 1978. С. 57–74.
35. Choi K.-S., Yang X., Clayton B.R., Glover E.J., Atlar M., Semenov B.N., Kulik V.M. Turbulent drag reduction using compliant surfaces // Proc. Royal Soc. London A. 1997. Vol. 453. С. 2229–2240.
36. Кулик В.М., Погода И.С., Семенов Б.Н. Экспериментальное изучение действия однослойных вязкоэластичных покрытий на турбулентное трение и пульсации давления на стенке // ИФЖ. 1984. Т. 47, № 2. С. 189–196.
37. Bandyopadhyay P.R., Henoeh C., Hrubes J.D., Semenov B.N., Amirov A.I., Malyuga A.G., Choi K.-S., Kulik V.M. Experiments on the effects of ageing on compliant coating drag reduction // Phys. Fluids. 2005. Vol. 17, No. 8. P. 085104.

Статья поступила в редакцию 23 июля 2010 г.