

УДК 532.591

Методология выбора однослойных податливых покрытий для снижения турбулентного трения

Б.Н. Семенов

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

E-mail: boris_n_semenov@mail.ru

Представлены основные принципы и методика разработки однослойных монолитных податливых покрытий для снижения турбулентного трения.

Ключевые слова: снижение сопротивления, податливое покрытие.

ВВЕДЕНИЕ

Описываемый анализ разрабатывался на основе теоретического решения, определяющего интерференционное влияние податливой границы на пристенную турбулентность [1]. Автор использовал модель пристенной турбулентности Штернберга [2]. Эта упрощенная линейная модель позволяет получить решение в аналитической форме. Это важно для анализа явления (а также для оценок новых численных решений). Как поле флуктуаций скорости, так и поле Рейнольдсовых напряжений формируются в результате суперпозиции двух волн: первой — идущей из турбулентного ядра, являющегося мощным стабильным генератором длинноволновых возмущений, и второй — отраженной от стенки. Придание границе свойств податливости ведет к изменению амплитуды и фазы индуцируемой волны и, соответственно, к изменению интерференционной картины порождения турбулентности. Влияние податливости может вести к уменьшению или увеличению турбулентных напряжений в зависимости от волновых свойств обтекаемой поверхности. Сравнение с экспериментальными данными подтвердило приемлемость интерференционного подхода [3].

1. ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

1.1. Основной моделирующий параметр

Для того, чтобы решить задачу о течении в вязком подслое турбулентного пограничного слоя вблизи податливой границы, необходимо записать следующие условия на стенке [1]:

$$u = w = 0, \quad v = i\omega p \Pi \exp(i\theta). \quad (1)$$

То есть, учитывая условие прилипания жидкости к стенке, продольная (u) и трансверсальная (w) компоненты скорости потока должны быть равны нулю,

а нормальная компонента v — равна скорости перемещения стенки под влиянием флуктуаций давления с амплитудой p .

Согласно интерференционной теории безразмерная комплексная податливость границы $\text{Пехр}(i\theta)$ (где модуль есть $\text{П} = \rho v_d^3 / (v C_d)$, а аргумент θ — фаза перемещения границы относительно турбулентной флуктуации давления) является основным моделирующим параметром. Здесь ρ и v суть, соответственно, плотность и кинематическая вязкость потока, v_d — скорость трения, $C_d = C_0 / K_d$, C_0 — статическая жесткость, а K_d — динамический коэффициент колебания покрытия, т. е. отношение амплитуды вынужденных колебаний при частоте $\omega = 2\pi f$ к перемещению при статическом нагружении ($\omega = 0$), где ω — угловая частота флуктуации давления, действующего на границу. В практике более удобно рассматривать противоположный параметр, называемый комплексной динамической жесткостью $\bar{C}_d \exp(i\theta)$, где $\bar{C}_d = 1/\text{П}$.

Для случая пассивного податливого покрытия $0 \leq \theta \leq 180^\circ$.

1.2. Два логических ограничения

Для корректного теоретического рассмотрения этой задачи должны быть поставлены два условия к моделированию и выбору колебательных характеристик податливой границы для снижения сопротивления.

Апериодичность турбулентных флуктуаций и их широкий спектр ведут к первому условию, согласно которому покрытие не должно иметь каких-либо свободных колебаний. Только такой подход позволяет получить однозначное решение этой задачи. Практически можно рассматривать достаточно быстрое затухание свободных колебаний, однако в этом случае достаточность определяется из эксперимента. Это первое логическое условие к выбору свойств вязкоупругой границы обусловлено не только моделью счета, но является физически строго необходимым при интерференционном рассмотрении. Потому что решение может иметь смысл, когда от каждой локальной пульсации давления свободные поверхностные волны на стенке не расходятся во все стороны, когда перемещения поверхности вынужденно следуют за нестационарным давлением, имеющим стохастическое распределение по поверхности.

Второе логическое условие ставит ограничение модуля податливости, следуя требованию гидравлической гладкости колеблющейся поверхности. Это ограничение возникает как необходимое условие при постановке рассматриваемой задачи о взаимодействии податливой границы и вязкого подслоя, поскольку вязкий подслей существует только около гладкой стенки. Проводя аналогию с влиянием на трение распределенной шероховатости, предполагалось, чтобы перемещения поверхности под действием пульсационных давлений были меньше критической высоты бугорков шероховатости.

Итак, согласно второму условию, определяется требуемая жесткость вязкоупругой границы [4]:

$$C_d \geq 0,007 \rho U_0^3 \text{Re}_0^{-0,3} / v. \quad (2)$$

Число Рейнольдса Re_0 основывается на расстоянии от носовой кромки до начала податливого покрытия x_0 .

Анализ экспериментальных результатов для покрытий, испытанных в воде в диапазоне скоростей потока от 0,5 до 21 м/с и в воздухе при скоростях от 5 до 70 м/с, при $10^5 < \text{Re}_0 \leq 8 \cdot 10^6$ показал приемлемость записанной формулы (2). Поскольку

при ее выводе была использована степенная форма профиля скорости с показателем $1/7$ (пригодная для $Re < 2 \cdot 10^6$), для больших чисел Рейнольдса можно рекомендовать [4] формулу, использующую форму профиля с показателем $1/11$:

$$C_d \geq 0,003 \rho U_0^3 Re_0^{-0,21} / \nu. \quad (2a)$$

1.3. Фазовый анализ

С учетом сделанных ограничений физический смысл действия вязкоупругой границы — его интерференционную природу — характеризует фазовый сдвиг θ . Анализ этого фазового сдвига определяет требуемые частотные характеристики покрытия.

Полученное решение [1] показывает, что изменение Рейнольдсова напряжения в пристенной области зависит от комплексной податливости и расстояния y от стенки. Так что необходимо определять интегральную характеристику действия податливой поверхности во всей пристенной области. Генерация турбулентности была выбрана в качестве критерия действия податливой стенки во всей пристенной области. Однако возможно рассчитывать Рейнольдсовы напряжения только до ординаты y менее предельной ординаты y_{lim} , определяемой согласно ограничениям теоретической модели Штернберга [2]. Влияние стенки наблюдается только для короткого расстояния от стенки: для $y < l$, но главная задача этих исследований как раз и есть изучение действия стенки. Здесь l — толщина динамического вязкого подслоя, определяемая как [2]

$$l \approx 5 / (\pi f / \nu)^{1/2}. \quad (3)$$

Расчетный анализ возможен, если ограничить решаемую задачу следующим образом:

- генерацию турбулентности для различных частот необходимо проинтегрировать в областях y для $0 \leq y \leq l(f) \leq y_{lim}$. Эта идея может быть реализована посредством ограничения нижней частоты, рассматриваемой в этом анализе,
- здесь необходимо рассматривать только изменение генерации турбулентности в результате действия податливой границы (но не саму генерацию турбулентности),
- анализ нужно выполнять при начальной абсциссе податливого покрытия x_0 , поскольку используемые параметры (профиль средней скорости $U(y)$, отношение трансверсального и продольного волновых чисел k_z/k_x , конвективная скорость U_c) могут быть определены из хорошо известных экспериментов на твердой поверхности,
- расчеты выполняются отдельно для каждой частоты без обобщения во всем частотном диапазоне, что позволяет устранить присущую модели Штернберга [2] погрешность определения частотного спектра.

Положительное действие податливой поверхности на турбулентное трение и шум (т. е. их уменьшение) связывается с уменьшением генерации турбулентности. Так что для фиксируемой частоты f изменение генерации турбулентности будет:

$$-\int_0^l \left[(u_f v_f)_f \left(\frac{dU}{dy} \right) - (u_f v_f)_c \left(\frac{dU}{dy} \right)_c \right] dy \geq 0. \quad (4)$$

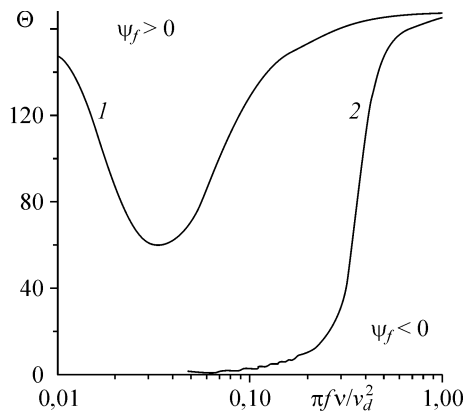


Рис. 1. Фазово-частотная диаграмма.

$$k_x = k_c, U_c^+ = 21,6, U^+ = 16 (1 - \exp(-y^+/16)) \quad (1),$$

$$U^+ = y^+ \quad (2).$$

Это — третье условие (в интегральной форме) для податливого покрытия, необходимое для достижения снижения сопротивления. Здесь индекс f показывает принадлежность только к рассматриваемой частоте, индекс c соответствует действию податливой поверхности. Интерференционное действие для фиксированной частоты f

нейтрально ($\Psi_f = 0$), если этот интеграл равен нулю. В этом (нейтральном) случае зависимость фазовой задержки θ от частоты является независимой от модуля податливости.

Два примера нейтральной линии показаны на рис. 1. Один расчетный вариант соответствует линейному профилю средней скорости, другой — профилю скорости, записанному Шубертом–Коркосом [5] (указанные профили обезразмерены с использованием скорости трения и вязкого линейного масштаба). Область выше нейтральной линии соответствует уменьшению порождения турбулентности ($\Psi_f > 0$, т. е. положительному действию податливости), ниже — увеличению ($\Psi_f < 0$, т. е. отрицательному действию податливости).

Поэтому, чтобы добиться снижения турбулентного сопротивления, необходимо обеспечить фазово-частотные характеристики податливых покрытий, располагающиеся в этой зоне выше нейтральной линии. Это третье условие для снижения турбулентного сопротивления — теперь в графической форме.

Видим, что в диапазоне $10^{-2} < \pi f v / v_d^2 < 0,2$ наблюдается языкообразное расширение фазово-частотной области положительного действия (ФЧОПД). Важно отметить, что это и есть область основного порождения Рейнольдсовых напряжений, согласно экспериментальным исследованиям пристенной турбулентности [6]. Анализ второго расчетного варианта ведет к верхнему пределу собственной частоты $f = 0$ податливого покрытия для возможности снижения сопротивления

$$\pi f_0 v / v_d^2 < 0,37. \quad (5)$$

Эти расчеты ориентировочные. Усовершенствованный интерференционный анализ [7] позволяет уточнить эти требования для конкретных чисел Рейнольдса и шероховатостей поверхности.

2. РАЗРАБОТКА ОДНОСЛОЙНЫХ МОНОЛИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ В ЗОНЕ ПЛАТО ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ

Вышеописанная теория интерференционного взаимодействия вязкоупругой границы с пристенной турбулентностью стала основой для разработки новых податливых покрытий, снижающих турбулентное трение.

Однослойное монолитное покрытие — это один из простейших типов вязкоупругих покрытий, где один гомогенный слой вулканизированной резины закреплен на твердой основе. Создание и исследование однослойных монолитных вязкоупругих покрытий продиктовано, с одной стороны, практической потребностью, а с другой стороны, задачами углубленного изучения и моделирования управления

пристенной турбулентности вязкоупругой поверхностью. В этих целях необходимо создавать достаточно дешевое покрытие, технологически простое не только для изготовления, но и для эксплуатации.

Многими экспериментаторами изучалось воздействие на пристенное турбулентное течение податливых покрытий “лабораторной схемы”: на твердом основании приклеен слой эластичного поропласта, пропитанный жидкостью и устланный тонкой гладкой непроницаемой пленкой. С этой схемой покрытия достигалось двукратное снижение турбулентного трения. Но покрытие “лабораторной схемы” очень чутко реагирует даже на небольшие градиенты давления — наполняющая жидкость перетекает под покрывающей пленкой в соответствии с распределением давления вдоль поверхности, при этом возникают бугры и впадины на покрытии, что приводит к нарастанию сопротивления. Другой эксплуатационный недостаток данной схемы, сильно усложняющий даже проведение экспериментов, — это возможное сильное деформирование покрывающей пленки, образование на ней “гармошки”, что также приводит только к нарастанию сопротивления. Однослойные монолитные покрытия лишены указанных недостатков — они могут быть использованы и при высоких градиентах давления и при высоких сдвиговых напряжениях. Конструктивно простейшая, однослойная схема обуславливает наиболее дешевую технологию изготовления покрытия. И наконец, в данном случае для каждого выбранного материала нужно смоделировать только один конструктивный параметр — толщину покрытия H .

Исходя из потребностей практики, основное внимание было уделено эластичным материалам, имеющим расширенное плато вязкоупругих свойств.

2.1. Расчет колебательных характеристик покрытия

Из механики полимеров [8] известно, что многие материалы в высокоэластичном состоянии имеют расширенное плато вязкоупругих свойств. Другими словами, упругий модуль E' и коэффициент потерь η (называемый в механике полимеров также тангенсом угла потерь) приближенно постоянны в широком диапазоне частот и температур. При этом вязкость материала (равная $\eta E'/\omega$) убывает с ростом частоты. Автор [9] описал колебательные характеристики однослойного изотропного покрытия из таких материалов в линейной двумерной постановке, рассмотрев перемещения столбикового элемента покрытия в функции времени и ординаты как при свободных, так и при вынужденных колебаниях.

Собственная частота ω_{rk} и угловая скорость затухания ω_{ik} свободных колебаний k -й гармоники ($k = 1, 2, \dots$) рассчитываются из следующих выражений:

$$\omega_{rk} = \omega_{0k} \sqrt{1/2 + 1/2\sqrt{1-\eta^2}},$$

$$\omega_{ik}/\omega_{rk} = \eta / \left(1 + \sqrt{1-\eta^2}\right),$$

учитывая, что собственная частота k -й гармоники чисто упругих колебаний ($\eta = 0$)

$$\omega_{0k} = \sqrt{E/\rho_0} \pi (2k-1)/2H. \quad (6)$$

Итак, в случае постоянного коэффициента механических потерь в материале: — степень затухания свободных колебаний, определяемая соотношением ω_{ik}/ω_{rk} , не зависит от толщины однослойного покрытия, а является только функцией коэффициента потерь,

– степень затухания всех форм свободных колебаний одинаковая (разумеется, в диапазоне действия закона постоянства комплексного модуля).

Результаты расчета степени затухания свободных колебаний показывают, что для покрытий из материалов с постоянным коэффициентом потерь уже при $\eta > 0,7$ удовлетворяется условие отсутствия биения при нестационарной нагрузке типа турбулентных пульсаций давления. Эти оценки допустимости использования материалов, по-видимому, чрезмерно строги. Вероятно, чтобы удовлетворить первому условию выбора покрытия для снижения трения (условию быстрого затухания свободных колебаний), вполне достаточно обеспечивать $\eta > 0,1$. Но в этом случае достаточность должна быть определена из эксперимента.

Для дальнейшего анализа необходимо рассчитывать амплитудно-фазовую характеристику покрытия при вынужденных колебаниях. Четыре примера результатов расчета представлены на рис. 2. Моделирующий параметр

$$H|\delta| = (\pi/2) (\omega/\omega_{01}) / (1 + \eta^2)^{1/4}. \quad (7)$$

В отличие от покрытий “лабораторной схемы” колебательные характеристики однослойных облицовок изменяются волнообразно. Из рис. 2 и выражения (7) видно, что цикл должен быть близок к π даже при $\eta = 0,5$. Максимумы K_d соответствуют нечетным точкам $\theta = 90^\circ$ на фазовой кривой, минимумы — четным. Первый экстремум — максимум — вблизи $H|\delta| \approx \pi/2$, второй экстремум — минимум —

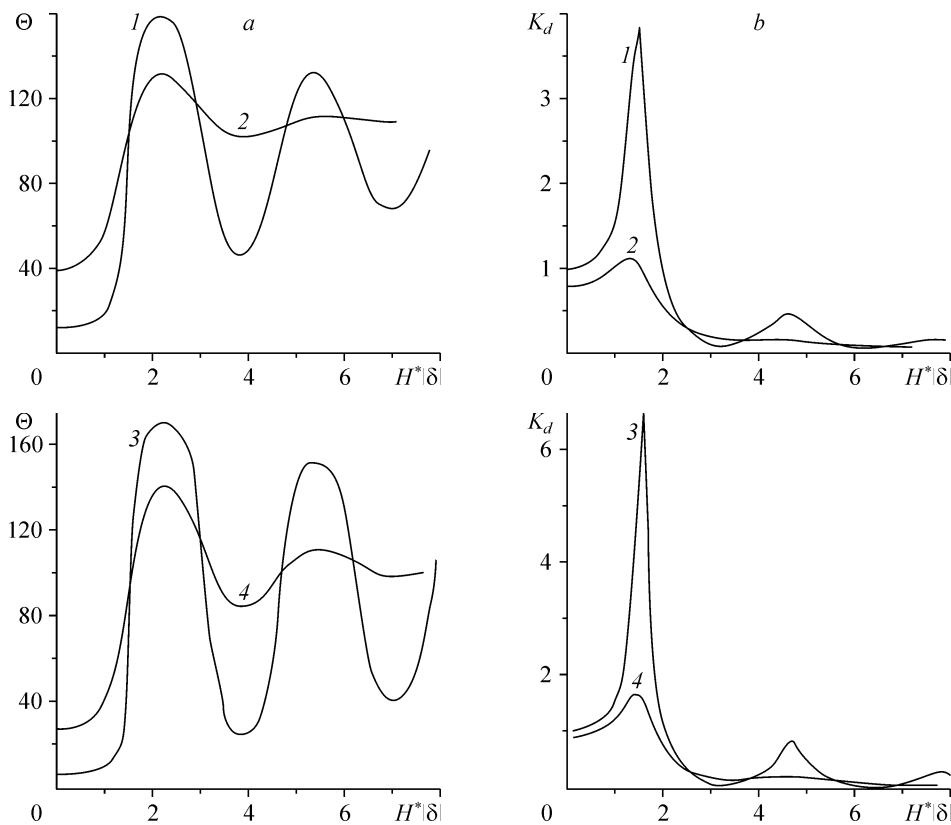


Рис. 2. Фазово-частотная (а) и амплитудно-частотная (б) характеристики вынужденных колебаний однослойных монокристаллических покрытий из материалов в зоне плато вязкоупругих свойств: $\eta = 0,2$ (1), $0,8$ (2), $0,1$ (3), $0,5$ (4).

при $H|\delta| \approx \pi$. Первый максимум фазового смещения при $H|\delta| \approx 3\pi/4$, первый минимум — при $H|\delta| \approx 5\pi/4$. С увеличением коэффициента потерь происходит выравнивание кривых.

Здесь следует отметить, что обычные вулканизированные резины массового производства, используемые в различных отраслях хозяйства, как правило, имеют очень низкий коэффициент механических потерь, менее 0,01. Даже не учитывая ограничений, вытекающих из рассмотрения свободных колебаний, можно сделать вывод, что применение таких резин для изготовления однослойных покрытий, по-видимому, бесперспективно — фазовая характеристика таких облицовок многократно пересечет нейтральную кривую, и вряд ли можно рассчитывать на существенный положительный интегральный эффект уменьшения порождения турбулентности.

Использование материалов с большими коэффициентами потерь дает надежду на уменьшение турбулентного трения, поскольку для конкретных гидродинамических условий подбором плотности, модуля упругости материала и толщины покрытия можно обеспечить фазовую характеристику, располагающуюся, в основном, в зоне положительного действия относительно петли нейтральной кривой. При более высоких частотах, как свидетельствуют приведенные выше расчетные результаты, фазовая характеристика покрытия неминуемо пересечет нейтральную кривую, уходя в зону отрицательного действия. Но поскольку с ростом частоты в этом диапазоне резко уменьшаются амплитуды пульсаций давления, то вклад этой области в изменение порождения турбулентности может оказаться несущественным.

Однако по сравнению с покрытиями “лабораторной схемы” здесь по вышеуказанным причинам прогнозируется меньшая эффективность снижения сопротивления.

2.2. Измерения вязкоупругих свойств материалов для податливых покрытий

Для расчета колебательных характеристик покрытия необходимо знать следующие свойства материала: его плотность ρ_0 , равновесный (или квазиравновесный) модуль Юнга E_∞ , коэффициент Пуассона μ_0 , комплексный модуль упругости, действительная часть которого E' называется упругим модулем, а мнимая составляющая E'' — модулем потерь (E''/E' — коэффициент потерь). В общем случае все параметры — функции температуры, а комплексный модуль зависит и от частоты колебаний.

Рабочие температуры в гидродинамических опытах обычно от +4 до $\sim +25$ °C. Исследования проводятся в воде, как правило, при скоростях $U_0 \leq 20$ м/с (только некоторые кавитационные трубы имеют скорость потока несколько больше), в воздухе — до 100 м/с и числа Рейнольдса внешнего обтекания — до $\sim 4 \cdot 10^7$.

При соблюдении условий (2) или (2а) в потоке с указанной максимальной скоростью статическая жесткость границы должна быть $\sim 10^9$ Н/м³. Причем, поскольку рассматриваются тонкие облицовки толщиной 1–10 мм, то речь идет об использовании для их изготовления низко модульных материалов ($E_\infty \approx 10^6$ – 10^7 Н/м²). Таковыми являются сшитые полимеры, находящиеся в высокоэластичном состоянии (резины). Изучение их вязкоупругих свойств базируется на методах механики полимеров [8]. Специфическим требованием, следующим из условий работы покрытия в широком диапазоне частот, присущем турбулентному течению, является

быстрое затухание или отсутствие свободных колебаний, что возможно только при применении материалов с большим коэффициентом потерь. Поэтому для измерения их динамических свойств нельзя использовать некоторые общепринятые методики, основанные на условии малых механических потерь. Для проверки справедливости вышеописанных теоретических прогнозов требуется знать комплексный модуль при циклических частотах $f \leq v_d^2/10\nu$. То есть, например, материалы покрытий, испытываемых в водном потоке, скорость которого 20 м/с, должны быть охарактеризованы в широком акустическом диапазоне до частот ~ 40 кГц.

Особо нужно подчеркнуть необходимость проведения измерений механических свойств полимерных материалов для покрытий при малых деформациях в диапазоне, соответствующем их работе в потоке. Для обеспечения гидродинамической гладкости покрытий перемещения границы должны быть не более $\sim 70 \nu/U_0$, т. е., например, при обтекании водой со скоростью 20 м/с — менее 3,5 мкм, что соответствует величине деформации $\sim 10^{-3}$ для облицовки толщиной 3,5 мм. Здесь неприемлемы методики, стандартные для резиновой промышленности, которые предусматривают выполнение измерений при деформациях больше на 2–3 порядка, поскольку вязкоупругие свойства полимерных материалов существенно зависят от величины деформации. При малых и больших деформациях различен механизм деформирования и образования потерь в материале [8]. Важно здесь отметить линейное вязкоупругое поведение полимеров при малых деформациях до $\sim 10^{-3}$, когда комплексный модуль практически не зависит от их величины даже для высоконаполненных резин.

С учетом изложенного при определении равновесного модуля Юнга резин для покрытий, воздействующих на пристенную турбулентность, целесообразно руководствоваться основными положениями государственного стандарта, определяющего для пластмасс условия выполнения измерений при малых деформациях растяжения и изгиба. Что касается измерений динамического модуля резин, то приемлемы в указанных целях лишь нестандартизованные приборы и методы, используемые при исследованиях в механике полимеров.

Для расширения частотного диапазона сведений о вязкоупругих свойствах исследуемой резины, измеряемых в диапазоне частот, ограниченном техническими характеристиками установок, опыты проводятся при широкой вариации температуры и при обработке данных используется температурно-временная аналогия Вильямса–Ландела–Ферри [8]

$$\log(f_1/f_2) = \frac{900(T_1 - T_2)}{(102 + T_1 - T_g)(102 + T_2 - T_g)}. \quad (8)$$

Она позволяет, используя это уравнение, соотнести комплексный модуль упругости, измеренный при температуре T_1 и частоте f_1 , со значениями температуры T_2 и частоты f_2 . Здесь $T_g = T_g + 50^\circ \text{K}$, а T_g — температура стеклования вязкоупругого материала.

Уравнение (8) позволяет пересчитать результаты динамических испытаний, проведенных при различных температурах, к температуре применения материала (например, температуре потока в гидродинамическом исследовании).

С учетом изложенных выше соображений в ИТ СО РАН был создан измерительный комплекс для аттестации полимерных материалов покрытий, воздействующих на пристенную турбулентность [10].

Созданная аппаратура и разработанные методики для измерения вязкоупругих свойств материалов стали основой материаловедческого поиска в целях разработки податливых покрытий практически пригодных схем.

2.3. Выбор материала

Созданию однослойных покрытий предшествовал материаловедческий поиск, проведенный путем анализа большого объема литературных данных о вязкоупругих свойствах полимерных материалов. Выяснилось, что на основе только четырех из сорока рассмотренных каучуков могут быть изготовлены вулканизаты, имеющие $\eta > 0,1$ в зоне высокоэластического плато вязкоупругих свойств (то есть может быть удовлетворено первое требование к свойствам однослойного покрытия, создаваемого для снижения турбулентного трения). Это сразу сильно ограничило круг рассматриваемых материалов.

Поскольку была поставлена задача создать покрытие, пригодное для практической инженерии, то в последующем поиске рассматривались только каучуки, производство которых (а также материалов на их основе) было уже промышленным. Поэтому, например, фторкаучук был пока исключен из дальнейшего рассмотрения.

И наконец, еще один важный фактор должен быть учтен при выборе материала — это обеспечение достаточно простой и дешевой технологии изготовления покрытия. Поэтому для разработки покрытия избирались низкомолекулярные кремнийорганические каучуки, сшивка которых осуществляется химическими реагентами при невысоких температуре и давлении.

2.4. Выбор покрытия и условий его использования

Последовательными шагами при выборе покрытия и условий его использования являются:

- изготовление образцов вулканизатов кремнийорганических каучуков и композиций на их основе,
- измерение вязкоупругих свойств представленных образцов материалов,
- расчетная оценка перспектив использования этих материалов.

При расчетной оценке перспектив использования материалов для изготовления покрытий, уменьшающих турбулентное трение, используется общее второе условие — ограничение податливости (2) или (2а).

Выбор же собственной частоты колебаний покрытия f_0 (третье условие), как уже выше было отмечено, рассматривается отдельно для каждой схемы покрытия, учитывая специфику ее амплитудно-фазово-частотной характеристики при соблюдении третьего основного принципа — необходимости размещать фазовую характеристику покрытия в расчетной ФЧОПД податливой границы согласно интерференционной теории.

Амплитудно-фазовая характеристика однослойного покрытия изменяется волнообразно с изменением частоты. Но расчеты показывают, что динамический коэффициент много меньше для второй формы колебаний покрытия по сравнению с первой. Поэтому, принимая во внимание также уменьшение амплитуды флуктуаций давления с ростом частоты, разумно выполнять оценки действия покрытия только для первой формы его колебаний, рассматривая частоты в диапазоне одной октавы. Справедливость этого допущения возрастает с ростом η . Итак, здесь рассматриваются узкополосные покрытия.

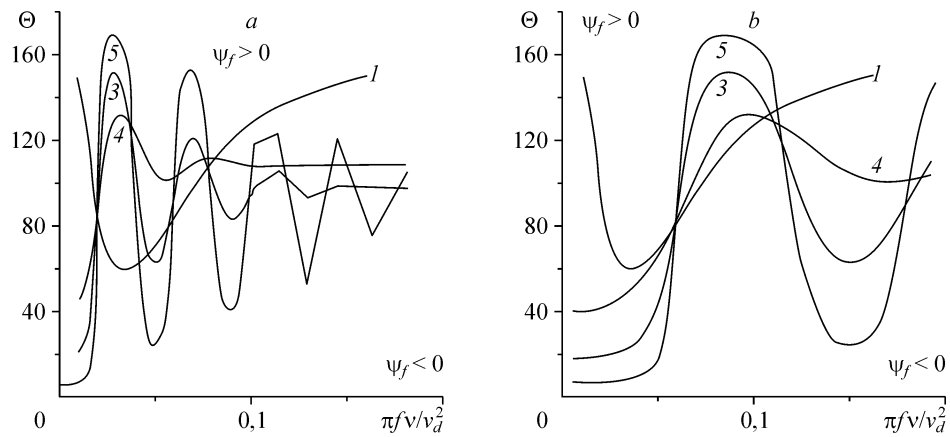


Рис. 3. Сравнение фазово-частотных диаграмм однослойных покрытий: $\eta = 0,3$ (3), $0,8$ (4), $0,1$ (5), с ФЧОПД (1); $\pi f_0 v / v_d^2 = 0,02$ (a), $0,06$ (b).

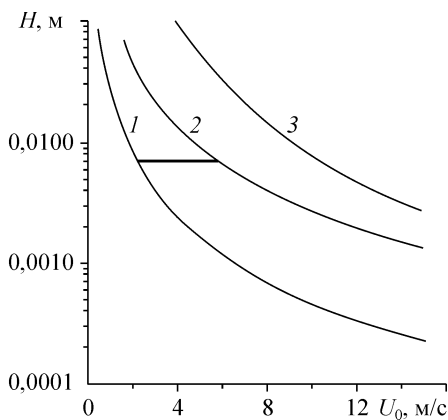
Известно, что ширина частотного диапазона ФЧОПД более четырех октав (если оценивать по значениям $\pi f_0 v / v_d^2$, то фазово-частотная область возможно-го положительного действия вязкоупругой границы простирается от $0,02$ до $0,37$). Естественен вопрос: в какой частотной зоне лучше иметь эту октаву?

Ответ можно получить, рассмотрев фазовую диаграмму в зависимости от частоты в линейном масштабе, представленную на рис. 3. Расширение частотной области положительного действия покрытия происходит при увеличении $\pi f_0 v / v_d^2$. Т. е. прогнозируется тенденция увеличения эффективности снижения турбулентного трения с увеличением собственной частоты колебаний покрытия. Отсюда условие (9) является предпочтительным ограничением для выбора собственной частоты колебаний однослойного покрытия —

$$0,06 < \pi f_0 v / v_d^2 < 0,37. \quad (9)$$

Ограничения (2) или (2a) и (9) используются для выбора толщины однослойного покрытия и прогнозирования гидродинамических условий возможности снижения турбулентного сопротивления этим покрытием при выполнении экспериментов.

Пример таких расчетов (для материала N2F [11]), выполненных графо-аналитически, показан на рис. 4 в координатах скорость воды–толщина покрытия. Согласно частотному условию (9), искомое решение должно быть расположено



в области, ограниченной линией 1 (для $\pi f_0 v / v_d^2 = 0,37$) и линией 2 (для $\pi f_0 v / v_d^2 = 0,06$). Это решение должно удовлетворять амплитудному ограничению (2), показанному линией 3, — оно должно быть расположено ниже линии 3. Здесь вся расчетная область, ограниченная линиями 1-2, заведомо удовлетворяет

Рис. 4. Расчет зоны положительного действия однослойного покрытия из материала N2F ($x_0 = 0,3$ м, $T = 20$ °С), $t = 6$ дням.

ограничению (2), т. к. она расположена значительно ниже линии 3. Поэтому возникает вопрос: не слишком ли мала податливость покрытий из материала N2F? Для опытов в водном канале [11] изготавливались покрытия толщиной 7 мм. Предсказываемый диапазон скоростей воды, соответствующий возможности снижения сопротивления, определяется здесь из частотного условия (он показан отрезком прямой линии) и соответствует ниже следующим значениям (для $x_0 = 0,3$ м, $T = 10$ °С) для свежизготовленного покрытия ($t = 6$ дней):

$$2,15 \text{ м/с} < U_0 < 5,75 \text{ м/с}.$$

Результаты испытаний такого свежего покрытия [11] (первая серия опытов, $t = 4$ дня) хорошо согласуются с расчетным прогнозом. Следует отметить, что при скорости потока 1,5 м/с, которая меньше нижнего расчетного скоростного предела возможности снижения трения этим покрытием, измерено увеличение турбулентного трения на ~ 7 %. Во всем расчетном скоростном диапазоне возможности снижения трения наблюдалось снижение сопротивления. Максимальное же снижение турбулентного трения измерено при скорости потока 5,7 м/с ($\Psi = 17,6$ %) вблизи верхнего расчетного скоростного предела возможности снижения трения этим покрытием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя, отметим, что представленная здесь методика разработки однослойных монолитных податливых покрытий для снижения турбулентного трения успешно апробировалась в ряде исследований, в том числе при выполнении двух серий международных экспериментов [12, 13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов Б.Н. О взаимодействии эластичной границы с вязким подслоем турбулентного пограничного слоя // Журнал прикладной механики и технической физики. — 1971. — №3. — С. 58–62.
2. Sternberg J. A theory for viscous sublayer of a turbulent flow // J. Fluid Mech. — 1962. — Vol.1 3, No. 2. — P. 241–271.
3. Кулик В.М. Анализ взаимодействия однослойных монолитных демпфирующих покрытий с турбулентным потоком // Инж.-физ. журн. — 1986. — Т. 51, № 6. — С. 959–965.
4. Semenov B.N. On conditions of modelling and choice of viscoelastic coatings for drag reduction // Recent Developments in Turbulence Management, Kluwer. — 1991. — P. 241–262.
5. Schubert G. & Corcos G.M. The dynamics of turbulence near a wall according to a linear model // J. Fluid Mech.—1967.—V. 29, N1.— P. 113-135.
6. Хинце И.О. Турбулентность. Ее механизм и теория. — Москва: ГИФМЛ, 1963. — 680 с.
7. Семенов Б.Н., Семенова А.В. Об интерференционном действии вязкоупругой границы на пристенную турбулентность // Теплофизика и аэромеханика. — 2002. — Т. 9, № 3. — С. 393–403.
8. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. — Москва: ИЛ, 1963. — 535 с.
9. Semenov B.N. Analysis of four types of viscoelastic coating for turbulent drag reduction // Emerging Techniques in Drag Reduction. — London and Bury St. Edmunds: MEP, 1996. — P. 187–206.
10. Kulik V.M., Semenov B.N. The measurement of dynamic properties of viscoelastic materials for turbulent drag reduction // Emerging Techniques in Drag Reduction.— London and Bury St. Edmunds: MEP, 1996. — P. 207–218.
11. Семенов Б.Н., Амиров А.И., Кулик В.М., Малюга А.Г. Экспериментальное исследование податливых покрытий для снижения турбулентного трения // Теплофизика и аэромеханика. — 2007. — Т. 14, № 1. — С. 139–149.
12. Choi K.-S., Yang X., Clayton B.R. et al. Turbulent drag reduction using compliant surfaces // Proc. of Royal Society, A. — 1997. — Vol. 453. — P. 2229–2240.
13. Bandyopadhyay P.R., Henoeh C., Hrubes J.D. et al. Experiments on the effects of aging on compliant coating drag reduction // Physics of Fluids. — 2005. — Vol. 17. — 9 p.

Статья поступила в редакцию 18 апреля 2008 г.