

УДК 532.591; 539.3.371

Об особенностях деформирования податливого покрытия пульсациями давления в турбулентном пограничном слое*

В.М. Кулик

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

E-mail: VictorKulik@itp.nsc.ru

Проведено сравнение измеренной ранее и рассчитанной в настоящей работе деформации податливого покрытия в турбулентном течении. Рассчитанная спектральная плотность деформаций покрытия на низких частотах (25–250 Гц) оказалась почти на два порядка выше измеренной, а среднеквадратичное значение величины измеренной деформации — в семь раз меньше расчетной. Рассчитан переходный режим установления вынужденных колебаний покрытия под действием волны давления. Показано, что покрытие практически всегда работает в переходном режиме, не достигая максимальных амплитуд деформаций, которые характерны для установившегося режима. Сделан вывод о необходимости использования более сложных граничных условий, учитывающих нестационарность процесса, т.к. амплитуда деформации покрытия сложным образом меняется за время жизни организованных структур, движущихся в турбулентном пограничном слое.

Ключевые слова: турбулентное течение, вязкоупругие свойства, динамическая податливость, граничные условия, стационарный режим, время установления вынужденных колебаний.

Введение

Величина деформации поверхности податливого покрытия под действием пульсаций давления обтекающего его течения является главным параметром, влияющим на ответную реакцию течения, которая может привести к затягиванию перехода к турбулентности, снижению турбулентного трения, уменьшению генерации звука и вибраций. Данные о успешных и неуспешных попытках использования «случайных» покрытий (без измерения их вязкоупругих свойств) приведены в обзорах [1–3]. Наиболее изученным оказалось влияние податливых покрытий на ламинарно-турбулентный переход [4–6]. Важное значение при анализе взаимодействия покрытий с потоком [7–10] приобрел метод прямого численного моделирования (DNS, Direct Numerical Simulation).

Первые измерения величины перемещения поверхности податливого покрытия были проведены в работах [11, 12]. Деформации измерялись бесконтактным методом, основанным на отклонении лазерного луча от деформируемой поверхности. Был достигнут значительный прогресс в увеличении точности метода: с 20 мкм до 2 мкм. В последние годы использование лазерных доплеровских виброметров позволило увеличить разрешение

* Работа выполнена по теме № 20.1.3, раздел III Программы ФНИ ГАН 2017–2020 гг.

до нескольких нанометров [13]. В работе [14] впервые были измерены две компоненты деформации поверхности с использованием голографической интерферометрии. В работах [15, 16] был развит метод одновременного измерения трехмерных параметров течения и двумерных деформаций поверхности покрытия. В исследовании [17] в качестве податливого покрытия использовался 16-миллиметровый слой прозрачной кремнийорганической резины, вязкоупругие свойства которой были измерены в частотном диапазоне (0,1–12) Гц.

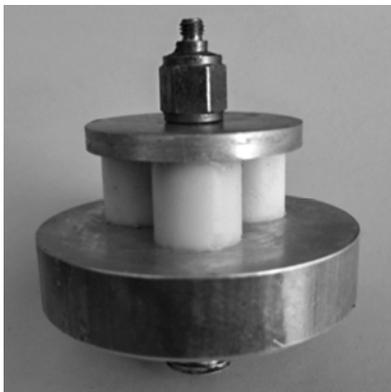
Метод измерения вязкоупругих свойств материалов в широком частотном диапазоне при малой амплитуде деформаций был развит авторами [18, 19], а в работах [20, 21] был разработан метод расчета динамической деформации покрытия бегущей волной давления. В первом разделе настоящего исследования аттестуются вязкоупругие свойства материала, являющимся аналогом материала, использованного в работе [17]. Приводится расчет динамической податливости покрытия, сделанного из этого материала и имеющего такую же толщину, как и в [17]. Рассчитывается спектр деформаций поверхности рассматриваемого покрытия под действием пульсаций давления турбулентного течения, имеющего скорость 2,5 м/с (как и в [17]). Во втором разделе обсуждается возможная причина полученного расхождения.

1. Сравнение измеренной и рассчитанной деформаций покрытия

1.1. Вязкоупругие свойства материала покрытия

В работе [17] для изготовления податливого покрытия использовалась прозрачная силиконовая резина Sylgard 184 фирмы Dow Corning с плотностью $\rho = 1,03 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Вязкоупругие свойства этого материала были измерены прибором Rheometrics Solids Analyzer (RSA II). Образец для измерений имел размеры $30 \times 6 \times 1 \text{ мм}^3$. Комплексный модуль упругости $E^* = E + iE' = (0,93 + i0,07) \text{ МПа}$ был определен в диапазоне частот (0,1–12) Гц при уровне относительной деформации, не превышающем 2 %.

Для корректного сравнения измеренного спектра пульсаций перемещения поверхности податливого покрытия [17] с теоретическим расчетом на основе [20, 21] необходимо знать вязкоупругие свойства материала покрытия во всем диапазоне частот его взаимодействия с потоком. В Институте теплофизики СО РАН имеется установка, на которой возможно проводить аттестацию вязкоупругих свойств материалов в широком частотном диапазоне при малых деформациях. Методика измерения вязкоупругих свойств подробно описана в работах [18, 19]. Она основана на решении двумерной задачи о динамической деформации образца с полным описанием граничных условий на всей его поверхности. В частности, для цилиндрического образца, приклеенного снизу к вибратору, а сверху к нагрузочной массе (рис. 1), необходимо измерить только отношение амплитуд вибраций его верхней и нижней поверхностей и фазовый угол между ними. Метод свободен от колебательных характеристик вибратора и не требует калибровок. Кроме этого, метод прост в эксплуатации, поскольку не требует настройки или юстировки.



Материал Elastosil RT 601 фирмы Wacker является аналогом материала, использованного в исследовании [17]. Образец для измерения вязкоупругих свойств состоит из трех цилиндров диаметром 10 мм и высотой 10 мм, приклеенных к вибрирующей площадке и к нагрузочной массе

Рис. 1. Образец для измерения вязкоупругих свойств материала покрытия.

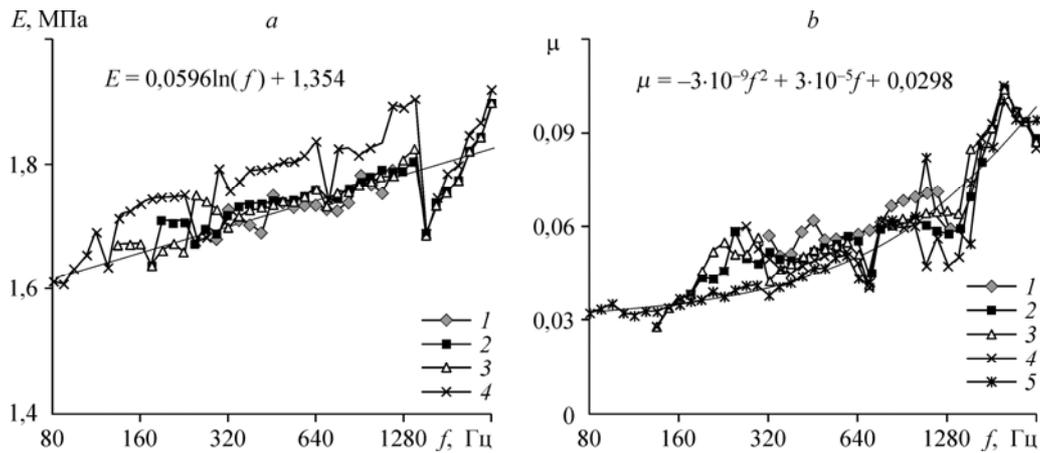


Рис. 2. Вязкоупругие свойства материала Elastosil RT 601.
 а — модуль упругости, $M/m = 2,54$ (1), 4,83 (2), 7,7 (3), 28,4 (4);
 б — коэффициент потерь, $M/m = 2,54$ (1), 4,83 (2), 7,7 (3), 14,6 (4), 28,4 (5).

с присоединенным миниатюрным датчиком ускорения, как показано на рис. 1. На рис. 2 представлены первичные экспериментальные данные при различных отношениях нагрузочной массы M к массе образца m . Модуль упругости несколько увеличивается с нагрузочной массой (рис. 2а), а коэффициент потерь уменьшается (рис. 2б). Причина этого была проанализирована в работах [18, 19] и было сделано заключение, что она является следствием увеличивающейся бочкообразности образца с ростом нагрузочной массы.

Известно, что коэффициент потерь μ равен отношению мнимой части комплексного модуля упругости к его действительной части и характеризует вязкие потери в материале. Коэффициент Пуассона σ , определяемый как отношение поперечной деформации образца к его продольному растяжению (сжатию), в данной работе принят равным 0,475 на основе предыдущих исследований с кремнийорганическими резинами. Верхняя и нижняя границы частотного диапазона, в котором выполнялись измерения вязкоупругих свойств, более чем на два порядка выше, чем в работе [17]. Отметим, что полученное в настоящей работе значение измеренного в диапазоне частот 80–2560 Гц (см. рис. 2а) модуля упругости больше измеренного в диапазоне частот 0,1–12 Гц в работе [17], где оно составило $E = 0,93$ МПа. Измеренный коэффициент потерь (см. рис. 2б) увеличивается с ростом частоты от 0,03 до 0,09, а в [17] указано только его среднее значение — $\mu = 0,074$. В представленной работе измерение вязкоупругих свойств материала проведено через три месяца после изготовления образцов. Известно [22, 23], что с течением времени кремнийорганические резины стареют, при этом модуль упругости увеличивается, а коэффициент потерь уменьшается. Это также может быть возможной причиной несовпадения результатов исследований (в работе [17] не представлено данных о времени старения образца).

1.2. Расчет динамической податливости

В теоретических исследованиях обычно изучается реакция покрытия на стационарную волну давления, распространяющуюся вдоль покрытия (по продольной координате x) [4–10]:

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

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны, U_c — конвективная скорость волны давления.

Смещение частиц среды определяется зависимостью

$$\xi = \mathbf{i}\zeta + \mathbf{j}\eta = \mathbf{f}(y)\exp(ik(x - U_c t)),$$

здесь ζ, η — компоненты смещения, направленные соответственно вдоль покрытия и перпендикулярно ему. Общее уравнение движения имеет вид [24]

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

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

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

Граничными условиями являются отсутствие смещения на твердой стенке

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

и равенство напряжений на внешней границе

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

Податливость есть отношение деформации к приложенному давлению. Соответственно смещениям поверхности податливость имеет две компоненты: перпендикулярную к поверхности — $C_n = |C_n| e^{i\theta_n}$ и параллельную ей — $C_p = |C_p| e^{i\theta_p}$.

Для расчетов и анализа удобно пользоваться безразмерными комплексами [20, 21]

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

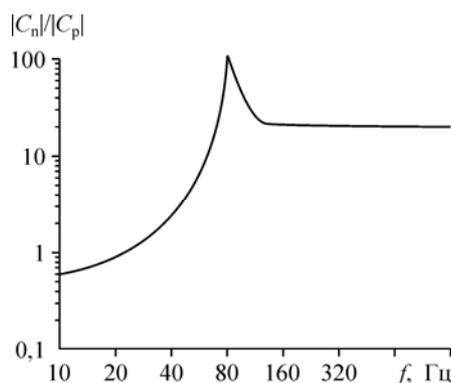
$$C_p^* = \frac{C_p}{H/E} = \frac{\lambda}{H} \frac{i2(1+\sigma)(S-1)}{2\pi \left[2 - \frac{(U_c/C_t^0)^2}{1-i\mu} - 2S \right]},$$

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

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

Эти колебательные характеристики покрытий зависят только от λ/H — отношения длины волны к толщине покрытия — и от V/C_t^0 — отношения скорости волны к скорости распространения сдвиговых возмущений в безграничной среде, заполненной материалом с модулем упругости E , но не имеющих вязких потерь ($\mu = 0$). C_n^* и C_p^* показывают соотношения соответствующих компонент динамической податливости покрытия к статической податливости стержня высоты H , у которого поперечный размер много меньше высоты. Отношение нормальной компоненты податливости к продольной компоненте подробно было исследовано в работах [20, 21]. На рис. 3 показано отношение модулей

Рис. 3. Отношение поперечной податливости к продольной компоненте для покрытия толщиной 25,4 мм, изготовленного из материала RT 601, для скорости течения 2,5 м/с.



компонент податливости для случая покрытия, использованного в [17], для анализируемого диапазона частот. Как видно из рисунка, продольная компонента податливости при $f > 80$ Гц в 20 раз меньше поперечной. Однако на низких частотах продольные и нормальные смещения становятся сопоставимы. Обычно при обсуждении взаимодействия податливого покрытия с течением рассматривается только нормальная компонента смещения, что в общем случае является необоснованным.

На рис. 4а показан модуль нормальной компоненты динамической податливости покрытия толщиной 16 мм, изготовленного из материала RT 601. В расчете было принято, что конвективная скорость $U_c = 0,72 U$ [17]. Податливость имеет вид изогнутого гребня, растущего с увеличением скорости и частоты. В работах [20, 21] было показано, что податливость имеет максимальное значение на скорости течения $U \approx 1,5C_r$, что для данного материала составляет 35 м/с. Это выше возможностей существующих гидродинамических стендов. Так, эксперимент [17] проводился на скорости $U = 2,5$ м/с. Частотная зависимость динамической податливости использованного покрытия на этой скорости приведена на рис. 4б. Как видно из рисунка, податливость имеет максимум на частоте $f = 50$ Гц, что совпадает с пиком спектральной плотности, отмеченном на fig. 9b в работе [17].

1.3. Расчет спектральной плотности деформаций поверхности

Для расчета величины деформации использовался энергетический спектр пульсаций давления $P(\omega)$ [25], полученный экстраполяцией измеренных спектров датчиками с различным диаметром чувствительной поверхности при устремлении диаметров

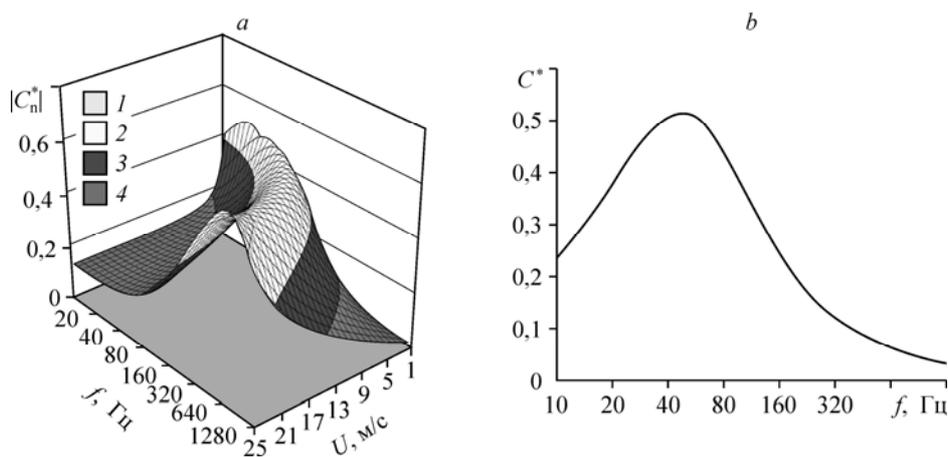


Рис. 4. Модуль динамической податливости покрытия толщиной 16 мм из материала RT 601, вычисленный в диапазоне скоростей 1–25 м/с (а) и зависимость динамической податливости от частоты при скорости течения 2,5 м/с (б).

$$a: |C_n^*| = 0,6-0,8 (1), 0,4-0,6 (2), 0,2-0,4 (3), 0-0,2 (4).$$

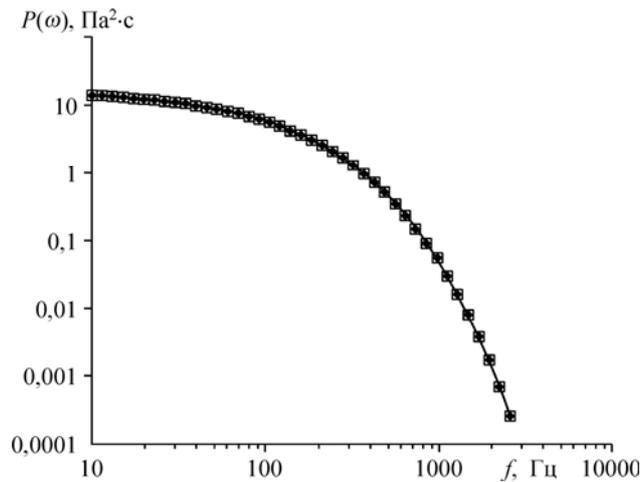


Рис. 5. Спектр пульсаций давления.

датчика к нулю:

$$\frac{P(\omega)U}{\tau_w^2 \delta^*} = \frac{70}{1 + \exp(3,9(f\delta^*/U)^{0,62})},$$

здесь δ^* — толщина вытеснения, U_τ — динамическая скорость, τ_w — касательное трение на стенке. Эта формула имеет универсальный характер, поскольку пригодна как для водных, так и для воздушных потоков, по крайней мере, до значений $f\delta^*/U = 3$. Расчет выполнен для значений параметров течения, приведенных в работе [17], а именно: $U = 2,5$ м/с, $U_\tau = 0,102$ м/с, $\tau_w = 18,73$ м/Па², и показан на рис. 5.

Для установившегося (стационарного) режима колебаний податливого покрытия волной давления, т.е. после окончания переходного периода установления вынужденных колебаний, спектральная плотность смещения поверхности [26] составляет

$$SDD(\omega) = |C_n(\omega)|^2 P(\omega),$$

а его среднеквадратичное значение рассчитывается как

$$\eta_{rms} = \sqrt{\overline{\eta^2}} = \left[\int_0^\infty |C_n|^2 P(\omega) d\omega \right]^{1/2}.$$

На рис. 6 приведено сравнение экспериментально измеренного в [17] спектра перемещения поверхности податливого покрытия со спектром, рассчитанным в настоящей работе при тех же параметрах. Определенное в эксперименте [17] среднеквадратичное значение прогиба поверхности покрытия $\eta_{rms} = 0,04$ мкм, а расчетная величина составила $\eta_{rms} = 0,28$ мкм. Возможная причина выявленного расхождения обсуждается в следующем разделе.

2. Установившийся и переходной режим деформаций податливого покрытия

Уже в первых работах, объясняющих затягивание ламинарно-турбулентного перехода в течении над податливым покрытием, устанавливалась связь деформаций поверхности покрытия с его колебательными свойствами. Так, в работе [27] был введен параметр комплексной податливости

$$C = \frac{\text{деформация поверхности}}{\text{пульсационное давление}},$$

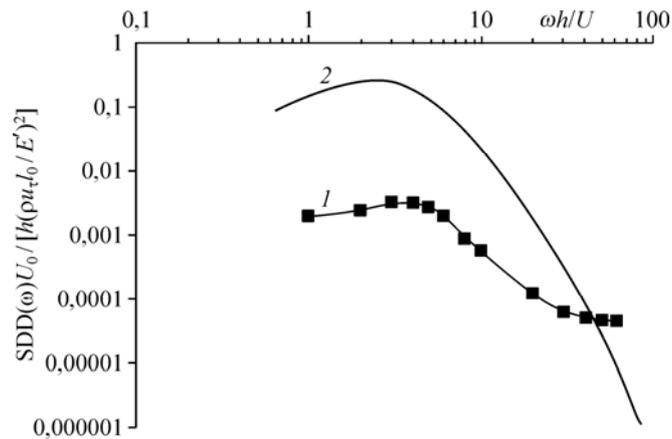


Рис. 6. Сравнение экспериментальных данных [17] для спектра перемещения поверхности податливого покрытия (1) и результатов расчета настоящей работы (2) при тех же параметрах покрытия и течения.

а в [28] — импеданс (mechanical admittance)

$$Y = - \frac{\text{скорость деформации поверхности}}{\text{пульсационное давление}}$$

Для гармонического анализа деформаций покрытия очевидна простая связь: $Y = i\omega C$.

Простейшие модели покрытий, описывающие только нормальную компоненту деформации, основаны на одномерной модели покрытия типа пружина–демпфер [1, 2, 7–10] и требуют знания трех параметров: инерции, жесткости и демпфирования (затухания колебаний из-за вязких потерь). В более развитой модели такого покрытия, учитывающей пленку, укрывающую пористый материал, используется уже 7 параметров покрытия [4, 5], некоторые из них практически невозможно измерить.

К настоящему времени выработаны общие принципы описания свойств однослойных покрытий, изготовленных из вязкоупругих материалов. Как правило, для этого используется комплексный модуль упругости $E^* = E(\omega)[1 - i\mu(\omega)]$, где E — динамический модуль упругости, μ — коэффициент потерь, как это было указано в главе 1. Двумерная модель расчета нормальной и продольной компонент деформации требует знания коэффициента Пуассона, который во многих работах принимают равным 0,5. В работе [29] колебательные свойства покрытия было предложено описывать комплексной динамической податливостью покрытия, включающей в себя коэффициент динамичности и фазовое отставание перемещения от давления, на основе измеренного комплексного модуля упругости материала покрытия.

Во всех предыдущих работах динамическая податливость рассчитывалась для стационарного режима деформирования, т.е. после завершения переходного процесса установления вынужденных колебаний. Такой упрощенный подход был предложен в первых работах [27, 28] для расчета ламинарно-турбулентного перехода в течении над податливым покрытием и, по-видимому, был оправдан, поскольку в этом случае, возможно, нет ограничения на вклад волн Толлмина–Шлихтинга. Эти же граничные условия стали применяться и для анализа взаимодействия податливого покрытия со структурами турбулентного пограничного слоя [7–10, 16, 21, 29], имеющими ограниченную длительность. Справедливость такого упрощения анализируется далее.

2.1. Расчет переходного процесса установления вынужденных колебаний

Из-за инерционности покрытия его деформация будет практически нулевой, если действующее давление является хаотическим. Для того чтобы покрытие смогло «раскачаться», приложенное воздействие должно быть согласованным в течение некоторого

времени. Если такое согласованное воздействие будет коротким, то амплитуда в конце воздействия окажется меньше, чем в случае стационарного воздействия с такой же вынуждающей силой.

В работе [30] изучался процесс установления вынужденных колебаний для одномерной модели покрытия. На рис. 7 показан процесс установления амплитуды и фазы деформаций на частоте первого резонанса покрытия (при $\omega_0 \approx \pi(E/\rho)^{0,5}/2H$ [29]) при ступенчатом включении гармонического возбуждения:

$$P(t) = 0 \text{ при } t < 0 \text{ и}$$

$$P(t) = P_0 \exp(i\omega_0 t) \text{ при } t > 0.$$

Расчет для рассматриваемого покрытия в настоящей работе выполнялся с параметрами $H = 16$ мм, $E = 1,6$ МПа, $\rho = 1,03 \cdot 10^3$ г/м³ по методике, описанной в [30]. Здесь для удобства сравнения амплитуда деформаций $|\eta(H, t)|$ нормирована на величину статической деформации $\Delta_{ст} = P \cdot H/E$. Видно, что величина коэффициента динамичности $K_d = |\eta(H, t)|/\Delta_{ст}$ и время переходного процесса сильно уменьшаются с ростом коэффициента потерь (рис. 7а). Скорость нарастания амплитуды колебаний примерно одинакова для разных η в начальный период релаксационного процесса (для $t < 0,5$ периода колебаний), а затем для меньших η она увеличивается. Процесс установления фазового сдвига θ слабо зависит от коэффициента потерь, причем для всего реального диапазона η фазовый угол успевает достичь стационарного значения примерно в течение одного периода колебаний.

В работе [30] было показано, что для раскачки покрытия до половинного уровня установившихся колебаний требуется время примерно в 2 раза меньшее, чем для раскачки до уровня 0,708 установившегося значения. Так, в случае покрытия из материала RT 601, которому соответствует коэффициент потерь $\eta = 0,08$, для раскачки до половинного уровня установившихся колебаний требуется более двух периодов колебаний, до уровня 0,708 — более четырех, а для достижения стационарного режима требуется более 10 периодов колебаний.

2.2. Время корреляции пульсаций давления

Пульсации давления в турбулентном течении в каждой точке обтекаемой поверхности представляют собой набор гармоник, которые возникают, достигают максимального значения и затухают, отражая движение вихревых структур вдоль поверхности [31, 32].

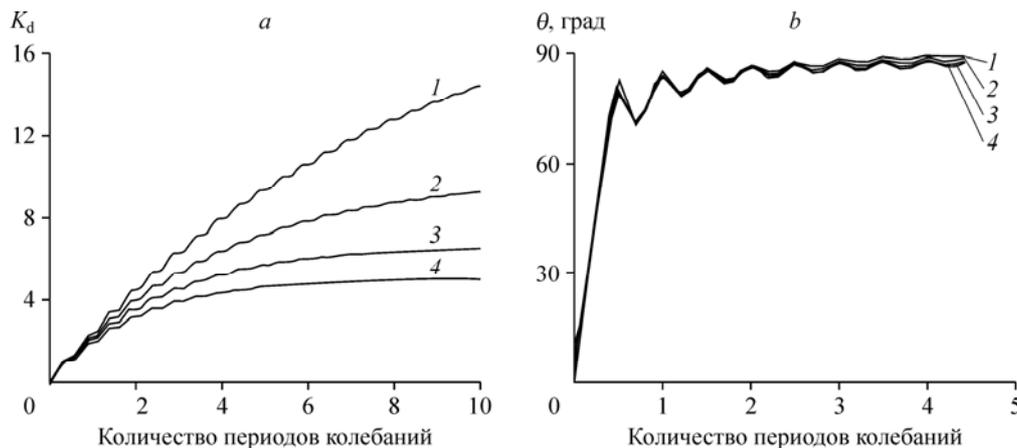


Рис. 7. Переходной процесс установления амплитуды (а) и фазы (б) вынужденных колебаний на частоте первого резонанса покрытия с $H = 16$ мм, $E = 1,6$ МПа, $\rho = 10^3$ г/м³.
 $\eta = 0,04$ (1), 0,08 (2), 0,12 (3), 0,16 (4).

Прямые записи пульсаций давления [32, 33] показывают, что длительность когерентного действия низкочастотных пульсаций, имеющих наибольшую амплитуду, составляет не более одного периода.

В работе [30] узкополосная фильтрация пульсаций давления проводилась импульсными фильтрами с конечной областью отклика. Датчик пульсаций давления имел диаметр чувствительной поверхности $D \approx 1,5$ мм и был установлен в зоне развитого безградиентного турбулентного течения заподлицо с обтекаемой поверхностью на буксируемом со скоростью 9 м/с теле вращения [34]. При прохождении вихревой структуры мимо датчика пульсаций давления узкополосный анализатор давал на выходе сигнал, огибающая которого имела куполообразную форму (цуг колебаний) [30]. Профильтрованные узкополосным фильтром пульсации давления носили квазикогерентный характер в течение времени прохождения вихревой структуры мимо датчика. Таким образом, время согласованного воздействия определялось длительностью цуга. На рис. 8 приведены типичные картины сигнала на выходе анализатора. Огибающая сигнала от проходящей мимо датчика вихревой структуры только в идеальном случае имеет форму симметричного меандра. Сравнивая огибающие сигналов между собой, легко заметить их некоторую корреляцию. В общем случае наблюдается сложение сигналов от нескольких структур. При 1/3-октавной фильтрации визуальное выделение цугов колебаний возможно при средней частоте фильтра $f_0 > 500$ Гц. С повышением частоты приходится применять более узкополосные фильтры.

Для описания реакции податливого покрытия на турбулентные пульсации давления необходимо знать величину и длительность участков их когерентного воздействия, т. е. форму огибающей цуга и число колебаний в нем. В общем случае на границах цугов происходит изменение фазы колебания. Значительные изменения фаз отмечены на рис. 8 звездочками. Число периодов колебаний в цуге увеличивается с частотой фильтрации и в среднем составляет от 5 на частоте 600 Гц до 10 на частоте 1,5 кГц. Последнее объясняется тем, что вихревая структура, порождающая пульсации давления различной частоты, движется как единое целое с некоторой конвективной скоростью. Для сравнения укажем, что в работе [35] на основании измерений [31] в расчетах было принято, что в цуге содержится шесть периодов колебаний.

Полученные результаты показывают, что покрытие практически всегда работает в переходном режиме, не достигая максимальных амплитуд деформаций, которые были бы при установившемся режиме. Это отличие резко увеличивается с уменьшением числа колебаний в цуге пульсаций давления и с уменьшением коэффициента потерь материала покрытия.

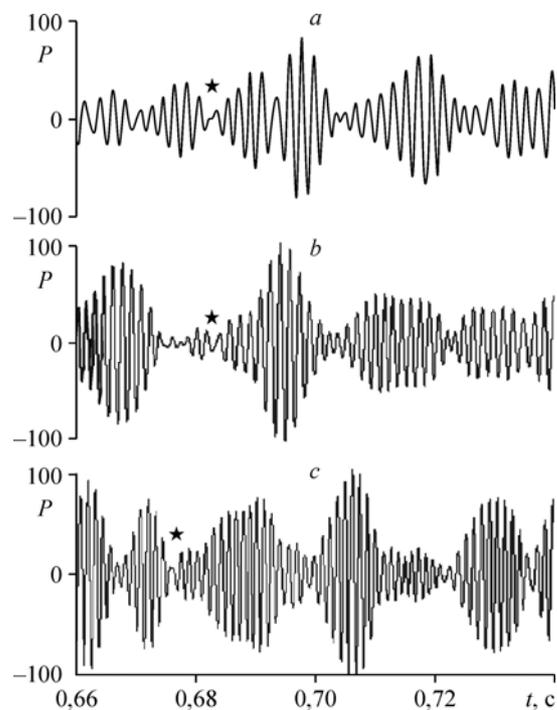


Рис. 8. Треть-октавная фильтрация пульсаций давления.

Средняя частота фильтра:
 $f_0 = 500$ (a), 630 (b), 794 (c) Гц.

Заключение

В работе проведено сравнение измеренной в работе [17] и рассчитанной в настоящем исследовании деформации податливого покрытия в турбулентном течении на основе двумерных возмущений давления $P(t) \sim \exp(ik(x - U_c t))$. Для корректного сравнения были измерены вязкоупругие свойства аналогичного материала покрытия во всем диапазоне частот его взаимодействия с потоком. На основе этих данных по двумерной модели деформации вязкоупругого покрытия рассчитана динамическая податливость. С использованием спектра пульсаций давления, измеренного на твердой поверхности, определена спектральная плотность деформаций покрытия, которая на низких частотах (25–250 Гц) имеет значения почти на два порядка выше измеренной спектральной плотности, а среднеквадратичное значение величины рассчитанной деформации в семь раз меньше измеренной.

Для выявления причины полученного расхождения рассчитан переходной режим установления вынужденных колебаний покрытия под действием волны давления. Показано, что покрытие практически всегда работает в переходном режиме, не достигая максимальных амплитуд деформаций, которые характерны для установившегося режима. Сделан вывод о необходимости использования более сложных граничных условий, учитывающих нестационарность процесса, поскольку амплитуда деформации покрытия сложным образом меняется за время жизни организованных структур, движущихся в турбулентном пограничном слое и деформирующих поверхность покрытия. Возможно, этого будет недостаточно, и для адекватного описания деформации покрытия турбулентными пульсациями давления потребуются проводить расчеты для трехмерных возмущений давления $P(t) \sim \exp(i[k_x(x - U_c t) + k_z z])$.

Список литературы

1. **Bushnell D.M., Hefner J.N., Ash R.L.** Effect of compliant wall motion on turbulent boundary layers // *Phys. Fluids*. 1977. Vol. 20. P. S31–S48.
2. **Riley J.J., Gad-el-Hak M., Metcalfe R.W.** Compliant coatings // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1988. Vol. 20. P. 393–420.
3. **Gad-el-Hak M.** Drag reduction using compliant walls. Flow past highly compliant boundaries and in collapsible tubes / Eds. P.W. Carpenter, T.J. Pedley // *Fluid Mechanics and its Applications*. 2003. Vol. 72. P. 191–229.
4. **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.
5. **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.
6. **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.
7. **Endo T., Himeno R.** Direct numerical simulation of turbulent flow over a compliant surface // *J. Turbulence*. 2002. Vol. 3. P. 007-1–007-10.
8. **Xu S., Rempfer D., Lumley J.** Turbulence over compliant surface: numerical simulation and analysis // *J. Fluid Mech.* 2003. Vol. 478. P. 11–34.
9. **Kim E., Choi H.** Space-time characteristics of a compliant wall in a turbulent channel flow // *J. Fluid Mech.* 2014. Vol. 756. P. 30–53.
10. **Luhar M., Sharma A.S., McKeon B.J.** A framework for studying the effect of compliant surfaces on wall turbulence // *J. Fluid Mech.* 2015. Vol. 768. P. 415–441.
11. **Gad-el-Hak M.** The response of elastic and viscoelastic surfaces to a turbulent boundary layer // *Trans. ASME J. Appl. Mech.* 1986. Vol. 53. P. 206–212.
12. **Hess D.E., Peattie R.A., Schwarz W.H.** A noninvasive method for the measurement of flow-induced surface displacement of a compliant surface // *Exp. Fluids*. 1993. Vol. 14. P. 78–84.
13. **Castellinu P., Martarelli M., Tomasini E.P.** Laser Doppler vibrometry: development of advanced solutions answering to technology's needs // *Mech. Syst. Signal Process.* 2006. Vol. 20. P. 1265–1285.
14. **Lee T., Fisher M., Schwarz W.H.** The measurement of flow-induced surface displacement on a compliant surface by optical holographic interferometry // *Exp. Fluids*. 1993. Vol. 14. P. 159–168.
15. **Zhang C., Miorini R., Katz J.** Integrating Mach–Zehnder interferometry with TPIV to measure the time-resolved deformation of a compliant wall along with the 3D velocity field in a turbulent channel flow // *Exp. Fluids*. 2015. Vol. 56, Iss. 11. P. 203-1–203-22.

16. **Benschop H.O.G., Greidanus A.J., Delfos R., Westrweel J., Breugem W.-P.** Deformation of a linear viscoelastic compliant coating in a turbulent flow // *J. Fluid Mech.* 2019. Vol. 859. P. 613–658.
17. **Zhang C., Wang J., Blake W., Katz J.** Deformation of a compliant wall in a turbulent channel flow // *J. Fluid Mech.* 2017. Vol. 823. P. 345–390.
18. **Kulik V.M., Semenov B.N., Boiko A.V., Seoudi B., Chun H.H., Lee I.** Measurement of dynamic properties of viscoelastic materials // *Experimental Mechanics.* 2009. Vol. 49. P. 417–425.
19. **Boiko A.V., Kulik V.M., Seoudi B., Chun H.H., Lee I.** Measurement method of complex viscoelastic material properties // *Int. J. Solids and Structures.* 2010. Vol. 47, No. 3–4. P. 374–382.
20. **Кулик В.М.** Вынужденные колебания слоя вязкоэластичного материала под действием конвективной волны давления // *Прикл. механика и техн. физика.* 2007. Т. 48. С. 221–228.
21. **Kulik V.M.** Action of a turbulent flow on a hard compliant coating // *Int. J. Heat and Fluid Flow.* 2012. Vol. 33. P. 232–241.
22. **Vandyopadhyay P.R., Henoeh C., Hrubes J.D., Semenov B.N., Amirov A.I., Kulik V.M., Malyuga A.G., Choi K.-S., Escudier M.P.** Experiments on the effects of aging on compliant coating drag reduction // *Physics of Fluids.* 2005. Vol. 17, No. 8. P. 085104-1–085104-9.
23. **Кулик В.М.** Старение податливых покрытий // *Инж.-физ. журн.* 2000. Т. 73, № 5. С. 1088–1092.
24. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теория упругости. 4-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 1987. 248 с.
25. **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.
26. **Кулик В.М.** Деформация вязкоупругого покрытия в турбулентном течении // *Теплофизика и аэромеханика.* 2009. Т. 16, № 1. С. 43–56.
27. **Benjamin T.B.** Effects of a flexible boundary on hydrodynamic stability // *J. Fluid Mech.* 1960. Vol. 9. P. 513–532.
28. **Landahl M.T.** On the stability of laminar incompressible boundary layer over a flexible surface // *J. Fluid Mech.* 1962. Vol. 13. P. 609–632.
29. **Семенов Б.Н.** Анализ деформационных характеристик вязкоупругих облицовок // *Гидродинамика и акустика пристенных и свободных течений.* Новосибирск: Изд-во ИТФ СО АН СССР, 1981. С. 57–76.
30. **Кулик В.М., Морозова С.Л.** Отклик податливого покрытия на турбулентные пульсации давления // *Теплофизика и аэромеханика.* 2001. Т. 8, № 1. С. 59–75.
31. **Willmarth W.W.** Structure of turbulence in boundary layers // *Adv. Appl. Mech.* 1975. Vol. 15. P. 159–254.
32. **Schewe G.** On the structure and resolution of wall-pressure fluctuations associated with turbulent boundary-layer flow // *J. Fluid Mech.* 1983. Vol. 134. P. 311–328.
33. **Russel S.J.** Measured wall pressure signatures of turbulence producing structures // *Proc. Intern. Symp. Seawater Drag Reduction.* Newport, RI, 1998. P. 63–71.
34. **Kulik V.M., Poguda I.S., Semenov B.N.** Experimental investigation of one-layer viscoelastic coatings action on turbulent friction and wall pressure pulsations // *Recent Developments in Turbulence Management / Ed. K.-S. Choi.* Dordrecht: Kluwer, 1991. P. 263–289.
35. **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.

*Статья поступила в редакцию 21 мая 2019 г.,
после доработки — 5 июня 2019 г.,
принята к публикации 26 августа 2019 г.*