

УДК 532.526.4:539.3

## Снижение трения податливыми покрытиями из гомогенного материала

В.М. Кулик<sup>1</sup>, А.В. Бойко<sup>2</sup>, И. Ли<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

<sup>3</sup>Пусанский национальный университет, Пусан, Корея

E-mail: vkulik@itp.nsc.ru

Экспериментально проверена возможность снижения трения за счет податливых покрытий из вязкоупругих силиконовых резин. Для этой цели из гомогенного материала была изготовлена серия однослойных покрытий различной толщины. Эксперименты проводились в высокоскоростной кавитационной трубе Пусанского национального университета. Динамические вязкоупругие свойства материалов покрытий тщательно измерялись. Область скоростей потока и толщин покрытий вычислялась в предположении, что покрытия могут интенсивно взаимодействовать с динамическими структурами турбулентного пограничного слоя только в области частот своей максимальной податливости. Предсказанная область параметров покрытий и скорости течения, где покрытия уменьшают трение, сравнивается с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** податливое покрытие, управление турбулентностью, снижение трения, динамическая податливость.

### Введение

Работы, проводимые с целью получения экспериментальных доказательств способности податливых покрытий уменьшать трение, известны уже давно. обстоятельные обзоры были проведены авторами исследований [1, 2], где также был представлен анализ экспериментов с «мягкими» покрытиями (гель или пористый материал, прикрытый тонкой пленкой). В результате взаимодействия потока с покрытием, на поверхности последнего развиваются нестабильные возмущения, приводящие к увеличению трения. Так, например, в работе [3] использовался материал, состоящий из 91 % силиконового масла с вязкостью 100 сСт и 9 % силиконовой резины. В экспериментах покрытие продемонстрировало только увеличение трения, поскольку на его поверхности возникли волны, имеющие  $\lambda$ -образную форму.

Применение более твердых материалов может предотвратить образование возмущений, поэтому их можно использовать для создания покрытий. В работах [4–7] показано, что поверхность «твердого» покрытия может оставаться гидравлически гладкой. Для типичного случая применения покрытия в водном потоке до скорости 20 м/с материал покрытия должен иметь сравнительно большой модуль упругости (более 1 МПа), что

предохраняет покрытие от развития возмущений на его поверхности и образования волн [8]. Несмотря на то, что величина деформации поверхности меньше толщины вязкого подслоя, движение поверхности не является пренебрежимой величиной [9].

При буксировке модели с твердым покрытием в открытом водоеме со скоростью 10–20 м/с было получено примерно двадцатипроцентное снижение трения [10]. Аналогичные покрытия были испытаны в лабораторных условиях в кавитационной трубе университета Ньюкасла [11], но на меньших скоростях: до 5 м/с. В первом случае измерения были проведены через несколько дней после изготовления покрытия, во втором — через четыре месяца. Силиконовая резина, обычно используемая для создания покрытий, из-за продолжающейся полимеризации изменяет со временем свои свойства (старится) [12, 13]. Несмотря на значительное время, прошедшее после изготовления покрытий, было зафиксировано снижение трения на 7 %, уменьшение интенсивности пульсаций давления на стенке и пульсаций касательного трения, а также интенсивности турбулентности.

Для понимания механизма взаимодействия покрытий с потоком необходимо иметь возможность точного измерения динамических (т.е. зависящих от частоты) механических свойств материалов покрытий. Это является непростой задачей, поэтому практически во всех предыдущих экспериментах с покрытиями отсутствует детальное описание вязкоупругих свойств в диапазоне частот взаимодействия покрытия с турбулентным течением. В работе [14] была выведена связь между волновыми параметрами покрытия и измеренными вязкоупругими свойствами его материала, такими как резонансная частота, дисперсия скорости распространения возмущений и их затухание. Метод измерения вязкоупругих свойств [15–17] позволяет определять модуль эластичности (или сдвиговый модуль) и коэффициент потерь в широком и практически важном диапазоне частот от 10 Гц до 4 кГц при относительной деформации от  $10^{-4}$  до  $5 \cdot 10^{-2}$ .

В настоящей работе возможность снижения трения за счет однослойных податливых покрытий, изготовленных из вязкоупругой силиконовой резины, проверена экспериментально в высокоскоростной водном канале. Одновременно с этими экспериментами в канале были тщательно измерены вязкоупругие свойства материалов покрытий. Это позволило рассчитать диапазон скоростей потока и частотный диапазон пульсаций давления, в которых взаимодействие покрытия с потоком максимально.

## 1. Описание эксперимента

### 1.1. Гидродинамическая труба

Эксперименты были проведены на высокоскоростной гидродинамической трубе Пусанского национального университета. Рабочая часть установки, показанная на рис. 1, имеет длину 2 метра и поперечное сечение  $200 \times 200 \text{ мм}^2$ . Максимальная рабочая скорость потока достигает 24 м/с и поддерживается автоматически с точностью до  $\pm 0,05 \text{ м/с}$ . Скорость потока измеряется двухкомпонентным лазерным доплеровским измерителем скорости (ЛДИС, Dantec Dynamics Inc.). Каждая секция канала оборудована дифференциальным датчиком давления. Уровень начальной турбулентности на оси канала составляет 0,6 %. Несмотря на то, что во время работы установки температура воды внутри нее увеличивается, изменение перепада давления не превышало 2 % за время проведения эксперимента.

Турбулентный пограничный слой развивается вдоль четырех стен тестовой секции. Поскольку добавочный турбулизатор не устанавливается, продольная координата  $x$  отсчитывается от передней кромки тестовой секции. Каждая стенка секции имеет три акриловых окна. В середине третьего окна вырезано прямоугольное отверстие размером  $100 \times 50 \text{ мм}^2$ , в которые вставляются плоские пластины толщиной 20 мм, как показано на рис. 2. Верхняя поверхность вставки может быть либо полированной, либо сделанной в виде ванночки для нанесения податливых покрытий. Величина зазора между стенкой

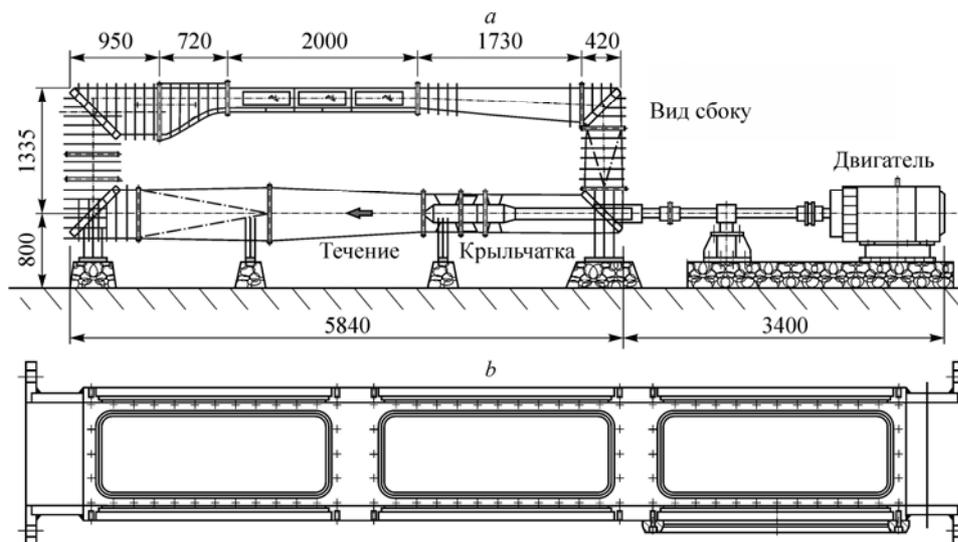


Рис. 1. Схема высокоскоростной кавитационной трубы и тестовой секции со встроенными весами, измеряющими трение на плоской вставке.

канала и прямоугольной вставкой, а также уровень поверхности последней каждый раз тщательно выставлялись с максимально возможной точностью, составлявшей  $30 \pm 5$  мкм относительно зазора и  $\pm 5$  мкм между стенкой и вставкой. Прямоугольная вставка оборудована тензометрической системой измерения силы трения. Весы надежно гидроизолированы,

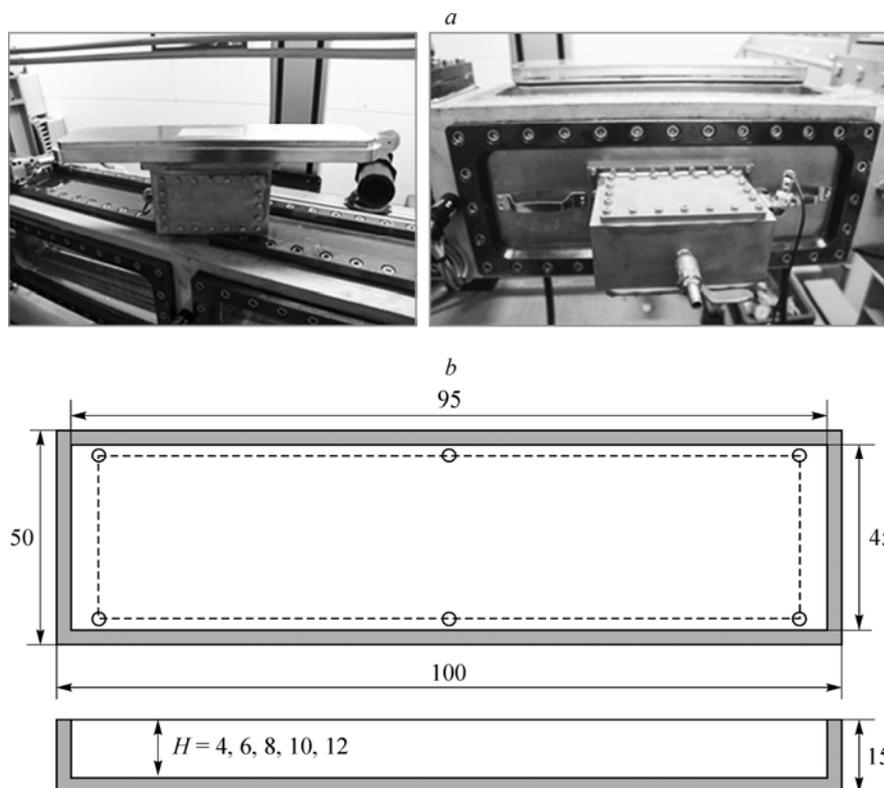


Рис. 2. Разборная секция канала (a) со сменной вставкой (b), на которой измеряется сила трения.

поскольку коробка, в которую они помещены во время эксперимента, частично заполняется водой. Податливые покрытия изготавливались методом заливки подготовленной композиции в ванночку, сделанную в сменной вставке (см. рис. 2). Поверхность ванночки обрабатывалась специальным раствором для повышения адгезии с силиконовой резиной. Весы измеряли силу трения на всей наружной поверхности вставки, однако площадь податливого покрытия составляла всего 85,5 % от наружной поверхности вставки.

## 1.2. Податливые покрытия

Для изготовления податливых покрытий использовались силиконовые резины RTV (Room Temperature Vulcanizing) фирмы Xiameter. Их основу составляет низкомолекулярный полидиметилсилоксан, имеющий структурную формулу  $[-O-Si(CH_3)_2]_n$  и представляющий собой очень вязкую жидкость (90 Poise). Эта основа (RTV 3133 BASE) смешивалась с катализатором (RTV 3081-F) в пропорции двадцать к одному и инжигировалась в соответствующие отливочные формы для изготовления податливых покрытий и образцов в целях измерения вязкоупругих свойств материала. Катализатор вызывает перекрестные сшивки макромолекул (полимеризацию), происходящие при комнатной температуре и атмосферном давлении. Перед заливкой в формы смесь тщательно перемешивалась и вакуумировалась в течении 10–15 минут для удаления пузырьков воздуха, которые могут привести к нежелательной пористости материала. Кроме свежеизготовленных покрытий применялись покрытия, использовавшиеся в предыдущих экспериментах [18]. Эти покрытия были изготовлены из RTV-резины фирмы Dow Corning и хранились в темном месте при комнатной температуре шесть с половиной лет (2357 дней). Большинство податливых покрытий показали увеличение трения в предварительных экспериментах. Детальный осмотр покрытий показал, что их поверхность стала вогнутой из-за произошедшей усадки материала. На покрытия толщиной 12 мм величина усадки в центре вставки составляла 0,3 мм. Покрытия подверглись тщательной шлифовке для выравнивания их поверхности и сохранения гладкости, при этом их толщина уменьшилась на 2,5 % от номинальной толщины, указанной на рис. 3. Результаты, полученные на выровненных покрытиях, будут обсуждаться в следующем разделе. Спустя полтора года был проведен второй этап исследований. Проверка покрытий показала дальнейшую усадку, которая не превышала 0,5 %. Их гидродинамические испытания, проведенные в кавитационной трубе, показали хорошее согласование с результатами первой серии экспериментов.

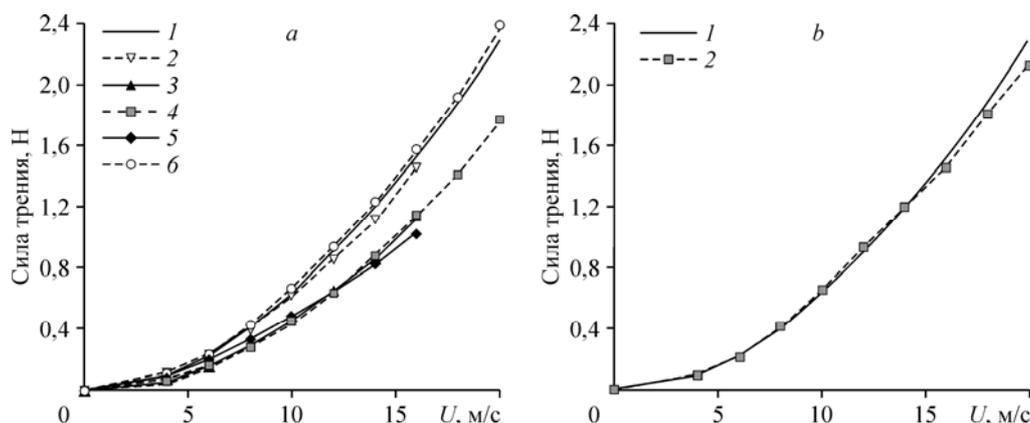


Рис. 3. Сила трения на вставке с твердой поверхностью и на вставках с податливыми покрытиями из материала RTV-3133 (а) и из материала S2 (б).

а: твердая поверхность (1), покрытия толщиной  $H = 4$  (2), 6 (3), 8 (4), 10 (5), 12 (6) мм;  
 б: твердая поверхность (1), покрытие толщиной  $H = 7$  мм (2).

## 2. Результаты измерений

Во время проведения экспериментов было обнаружено, что прочности покрытий недостаточно для работы на высоких скоростях потока. По этой причине максимальная скорость течения не превышала 20 м/с.

Результаты измерения силы трения на твердой вставке и на рассматриваемых податливых покрытиях различной толщины, изготовленных из материала RTV-3133, показаны на рис. 3а. Из рисунка видно, что взаимодействие между покрытиями и потоком в значительной мере зависит от толщины покрытия. Поведение покрытий с толщиной 4 и 12 мм слабо отличается от твердой стенки. Покрытия с толщиной 6, 8 и 10 мм продемонстрировали примерно одинаковое поведение, характеризующееся значительным снижением трения, монотонно изменяющимся в зависимости от скорости течения.

На рис. 3б приведены результаты измерения силы трения на твердой вставке и на вставке с покрытием толщиной 7 мм, изготовленным из материала S2. Как видно, взаимодействие покрытия с потоком является очень слабым. На низких скоростях течения сила трения на покрытии несколько больше, чем на твердой поверхности. Однако на скорости, превышающей 16 м/с, было зафиксировано небольшое снижение трения.

## 3. Дискуссия и обсуждение результатов

### 3.1. Вязкоупругие свойства материалов покрытий

Вязкоупругие свойства материалов могут быть описаны различными путями. В настоящей работе используется динамический модуль упругости, являющийся комплексной величиной:  $E^*(f) = E(1-i\mu)$ , здесь  $E$  и  $\mu$  — частотнозависимые модуль эластичности и коэффициент потерь.

Методика измерения вязкоупругих свойств подробно описана в работах [16, 17]. 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, необходимо измерить только отношение амплитуд вибраций его верхней и нижней поверхностей и фазовый угол между ними. Метод прост в эксплуатации, поскольку используется только стандартное оборудование для создания и измерения вибраций. В настоящей работе вязкоупругие свойства материалов покрытий измерялись одновременно с проведением их тестирования в кавитационном канале. На рис. 4 показаны вязкоупругие свойства материала RTV-3133, измеренные через 43 дня после изготовления

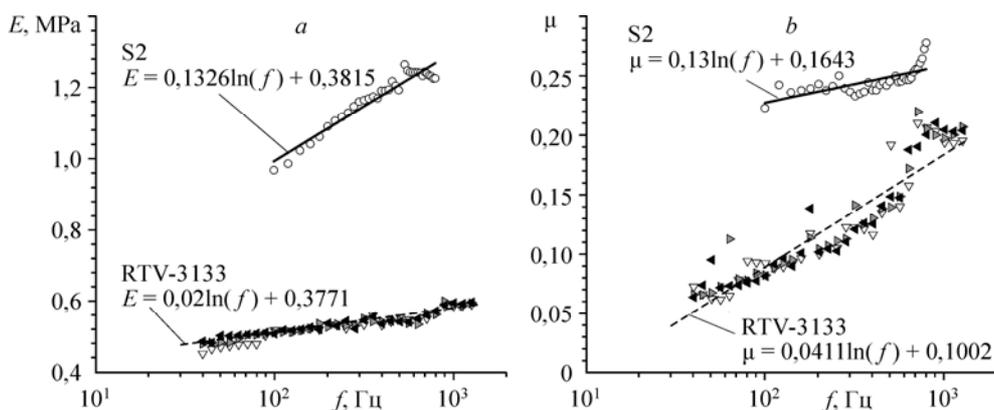


Рис. 4. Вязкоупругие свойства материала S2 (кружки) и материала RTV-3133 (треугольники) и их линейная аппроксимация.

$a$  — модуль упругости  $E$ ,  $b$  — коэффициент потерь  $\mu$ .

образца, и материала S2, измеренные через 2375 дней. Приведены простые линейные аппроксимации полученных данных, которые использованы в следующем разделе для анализа взаимодействия покрытия с потоком.

### 3.2. Расчет динамической податливости

Точное предсказание снижения трения требует решения уравнений Навье–Стокса с учетом подвижной границы. Однако резонно предположить, что одним из обязательных условий для эффективного управления характеристиками течения является требование максимального взаимодействия между покрытием и потоком. Хотя это требование не является достаточным, оно весьма полезно для определения параметров покрытия и течения, где может ожидать снижение (или увеличение) сопротивления трения.

Динамическая податливость есть отношение величины смещения поверхности податливого покрытия к приложенному динамическому напряжению, вызываемому турбулентными пульсациями давления. В работах [4–6] была рассчитана динамическая податливость плоского слоя гомогенного вязкоупругого материала толщиной  $H$ , плотностью  $\rho$ , с модулем эластичности  $E$ , коэффициентом потерь  $\mu$  и коэффициентом Пуассона  $\sigma$ . Соответственно смещениям поверхности податливость покрытия имеет две компоненты — перпендикулярную к поверхности  $C_n$  и параллельную ей  $C_p$ . Обычно предполагается, что нормальная компонента вносит намного больший вклад во взаимодействие между покрытием и потоком, поэтому далее проводится расчет именно этой компоненты податливости. Податливость удобно представлять в безразмерном виде как  $C_n^* = C_n / (H / E_0)$  — отношение динамической податливости покрытия к статической податливости (со статическим модулем упругости  $E_0$ ) стержня высоты  $H$ , у которого поперечный размер много меньше высоты. Нормальная компонента динамической податливости представляет собой комплексную величину  $C_n^* = |C_n^*| e^{i\theta_n}$ , где  $|C_n^*|$  — модуль податливости, а  $\theta_n$  — фазовое отставание нормальной компоненты смещения поверхности от действующего давления. В работах [4–6] также было показано, что для конвективной волны давления, бегущей вдоль покрытия со скоростью  $V$  и имеющей длину волны  $\lambda$ , динамическая податливость зависит только от  $\lambda/H$  — отношения длины волны к толщине покрытия и от  $V/C_t$ , где  $C_t = \sqrt{E(f) / [2\rho(1+\sigma)]}$  — скорость распространения сдвиговых возмущений в безграничной среде, заполненной материалом с модулем упругости  $E$ , но не имеющим вязких потерь ( $\mu = 0$ );  $f = V/\lambda$ . Для расчетов принято, что скорость волны давления, вызываемая движением вихревых структур в пограничном слое турбулентного течения, составляет  $0,8U$ , где  $U$  — скорость течения. Это верхняя граница конвективной скорости [19], соответствующая движению больших вихрей. Нижняя граница конвективной скорости определяется движением мелкомасштабных вихрей, и в этом случае  $V = 0,69U$  [20].

На рис. 5 представлены распределения нормальной компоненты динамической податливости покрытий различной толщины, изготовленных из материала RTV-3133. При скоростях потока больших 20 м/с податливость имеет гребень большой величины, вытянутый вдоль оси скорости. Максимальная податливость соответствует пику этого гребня, положение которого сдвигается в сторону низких частот при увеличении толщины покрытия. На скорости течения ниже 16–17 м/с гребень нормальной податливости разделяется на два вторичных гребня, которые уменьшаются один с увеличением, а другой с уменьшением частоты. Положение вторичных гребней не зависит от толщины покрытия, а определяется только вязкоупругими свойствами материала.

На рис. 6 показано изменение фазы податливости в зависимости от частоты возмущения и скорости течения. С ростом скорости и частоты начинается изменение фазы.

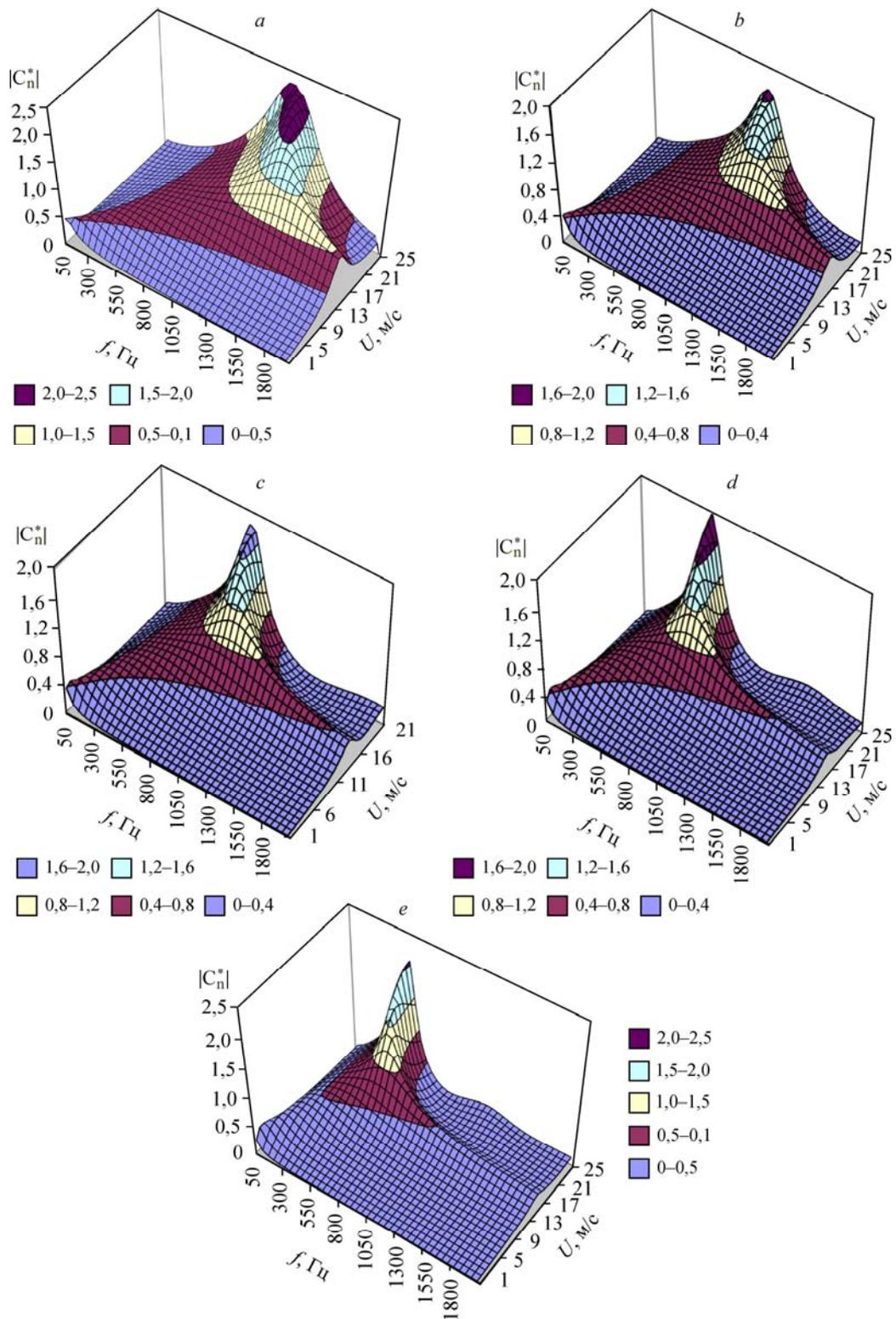


Рис. 5. Модуль нормальной динамической податливости для покрытий различной толщины, изготовленных из материала RTV-3133.

$H = 4$  (a), 6 (b), 8 (c), 10 (d), 12 (e) мм.

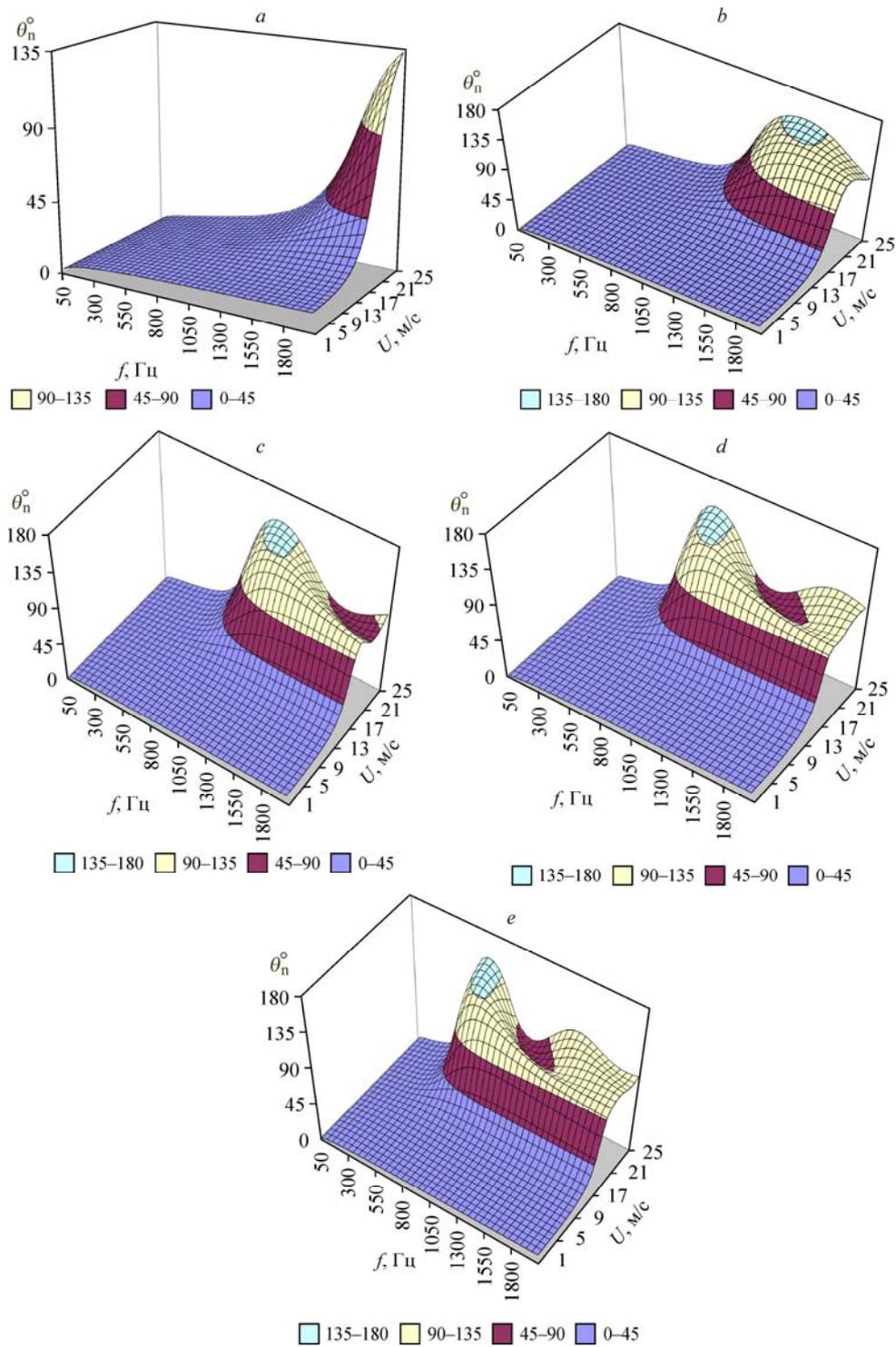


Рис. 6. Фазовый сдвиг между нормальным смещением поверхности покрытий из материала RTV-3133 и приложенным давлением. Обозначения см. на рис. 5.

Пороговое значение частоты для начала роста сдвига фазы зависит от толщины покрытия, а пороговое значение скорости — не зависит. На частоте возмущений, соответствующих

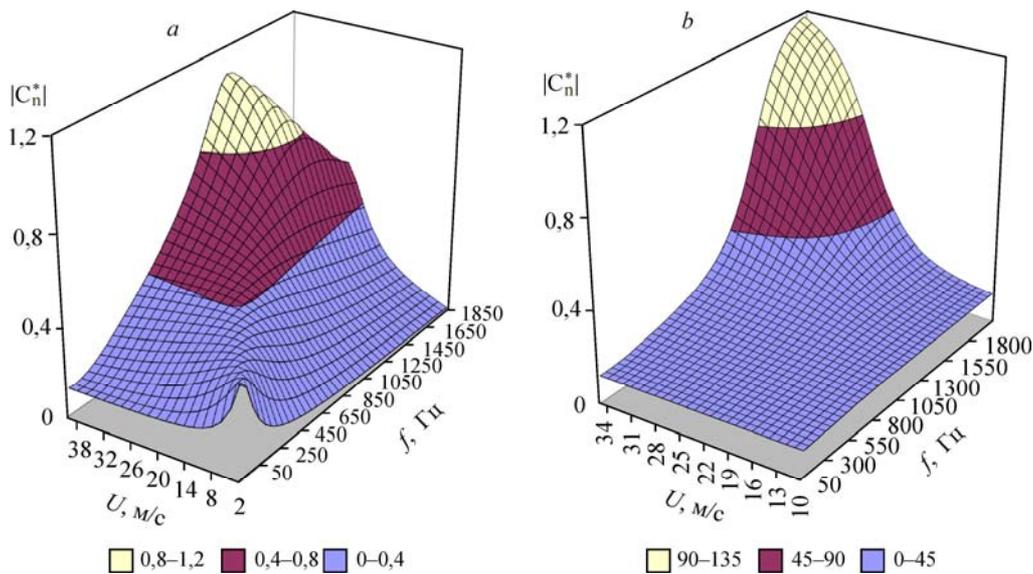


Рис. 7. Модуль нормальной динамической податливости (а) и фазовый сдвиг между нормальным смещением поверхности покрытия и приложенным давлением (b) из материала S2.

пику податливости,  $\theta_n \approx 90^\circ$ . В целом картина изменения фазы соответствует закономерностям изменения модуля податливости, а именно: наличие гребня на низкой скорости, уходящего в сторону высоких скоростей, и гребня на низкой скорости, уходящего в высокие частоты (см. рис. 5 и 6). Таким же образом было показано, что покрытие из материала S2 толщиной 7 мм имеет пик нормальной податливости на скорости потока  $U \approx 35$  м/с (см. рис. 7a). Значение фазы на плато  $\theta \approx 15^\circ$  (см. рис. 7b) имеет довольно большую величину по сравнению с RTV-3133, что объясняется большим коэффициентом потерь материала S2 ( $\mu \approx 0,25$ ). Однако несмотря на различие свойств материалов, поведение покрытия из материала S2 (см. рис. 4b) похоже на поведение покрытия из материала RTV-3133 толщиной 4 мм. Следовательно, относительно слабое влияние этого покрытия на трение может быть объяснено его низкой податливостью.

Чтобы была возможность использовать податливые покрытия на практике, они должны обладать достаточной прочностью, т.е. их модуль упругости должен быть большим. Это приводит к требованию высокой скорости течения, на которой будет достигаться пик податливости. В качестве одного из вариантов преодоления этой трудности рассматривается предложение работать на скоростях, соответствующих вторичным гребням податливости. Несмотря на то, что податливость на вторичных гребнях в несколько раз меньше пикового значения, частотный диапазон взаимодействия покрытий с потоком в этом случае значительно шире, а изменение фазы намного плавнее, что может привести к усилению взаимодействия покрытия с потоком. Анализируя представленные результаты, можно выделить два сценария взаимодействия:

- резонансное взаимодействие в относительно узком частотном диапазоне пика податливости, который зависит от толщины покрытия;
- широкополосное взаимодействие с меньшей интенсивностью, но на низкой скорости потока.

### Выводы

Экспериментально изучено влияние однослойных податливых покрытий на снижение трения в высокоскоростном (до 20 м/с) водном потоке. Для изготовления покрытий использовались две различные марки силиконовых резин. Одновременно с проведением

экспериментов в водном канале были измерены динамические вязкоупругие свойства материалов покрытий в широком частотном диапазоне, соответствующие диапазону пульсаций давления на стенке при рассмотренных скоростях течения. Подробные данные о вязкоупругих свойствах материалов покрытий и данные о гидродинамической эффективности этих покрытий необходимы для верификации различных теорий взаимодействия покрытий с течением. С использованием измеренных вязкоупругих свойств покрытий рассчитана их комплексная динамическая податливость и предложены два сценария взаимодействия покрытия с потоком. Показано, что полученные экспериментальные результаты хорошо соответствуют сценарию широкополосного взаимодействия, реализуемому на скорости течения, где проявляется низкоскоростной гребень податливости. Эти результаты поддерживают предложенную методику предсказания области параметров покрытия и течения, где их взаимодействие будет эффективно.

### Список литературы

1. **Bushnell D.M., Hefner J.N., Ash R.L.** Effect of compliant wall motion on turbulent boundary layers // *Physics of Fluids*. 1977. Vol. 20. S31–S48.
2. **Gad-el-Hak M.** Compliant coatings: a decade of progress // *Applied Mechanics Review*. 1996. Vol. 49. P. 147–157.
3. **Lee T., Fisher M., Schwarz W.H.** Investigation of the stable interaction of a passive compliant surface with a turbulent boundary layer // *J. of Fluid Mechanics*. 1993. Vol. 257. P. 373–401.
4. **Кулик В.М.** Вынужденные колебания слоя вязкоэластичного материала под действием конвективной волны давления // *Прикл. механика и техн. физика*. 2007. Т. 48. С. 221–228.
5. **Кулик В.М.** Деформация вязкоупругого покрытия в турбулентном течении // *Теплофизика и аэромеханика*. 2009. Т. 16, № 1. С. 43–55.
6. **Kulik V.M.** Action of a turbulent flow on a hard compliant coating // *Int. J. of Heat and Fluid Flow*. 2012. Vol. 33. P. 232–241.
7. **Кулик В.М.** О граничных условиях на податливой стенке в турбулентном течении // *Теплофизика и аэромеханика*. 2013. Т. 20, № 4. С. 445–450.
8. **Duncan J.H.** The response of an incompressible, viscoelastic coating to pressure fluctuations in a turbulent boundary layer // *J. of Fluid Mechanics*. 1986. Vol. 171. P. 339–363.
9. **Кулик В.М.** Особенности деформирования податливых покрытий, обладающих повышенной прочностью // *Теплофизика и аэромеханика*. 2011. Т. 18, № 4. С. 567–581.
10. **Kulik V.M., Poguda I.S., Semenov B.N.** Experimental investigation of one-layer viscoelastic coating action on turbulent friction and wall pressure fluctuations // *Recent Developments in Turbulence Management* / ed. K.-S. Choi. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991. P. 263–289.
11. **Choi K.-S., Yang X., Clayton B.R., Glover T., Atlar M., Semenov B.N., Kulik V.M.** Turbulent drag reduction using compliant surfaces // *Proc. Royal Society London, Ser. A*. 1997. Vol. 453. P. 2229–2240.
12. **Кулик В.М.** Старение податливых покрытий // *Инж.-физ. журнал*. 2000. Т. 73. № 4. С. 712–718.
13. **Bandyopadhyay P.R., Henoeh C., Hrubes J.D., Semenov B.N., Amirov A.I., Kulik V.M., Malykh N.V., Malyuga A.G., Choi K.-S.** Experiments on the effects of aging on compliant coating drag reduction // *Physics of Fluids*. 2005. Vol. 17. P. 085104-1–085104-9.
14. **Kulik V.M., Lee I., Chun H.H.** Wave properties of coating for skin friction reduction // *Physics of Fluids*. 2008. Vol. 20. P. 075109-1–075109-10.
15. **Кулик В.М., Семенов Б.Н., Морозова С.Л.** Измерение динамических свойств вязкоупругих материалов // *Теплофизика и аэромеханика*. 2007. Т. 14, № 2. С. 219–230.
16. **Kulik V.M., Semenov B.N., Boiko A.V., Seoudi B.M., Chun H.H., Lee I.** Measurement of dynamic properties of viscoelastic materials // *Experimental Mechanics*. 2009. Vol. 49. P. 417–425.
17. **Boiko A.V., Kulik V.M., Seoudi B., Chun H.H., Lee I.** Measurement method of complex viscoelastic material properties // *Int. J. of Solids and Structures*. 2010. Vol. 47, No. 3–4. P. 374–382.
18. **Boiko A.V., Kulik V.M., Chun H.H., Lee I.** Verification of drag-reduction capabilities of stiff compliant coatings in air flow at moderate speeds // *Int. J. of Naval Architecture and Ocean Engng.* 2012. Vol. 3. P. 242–253.
19. **Cantwell B.J.** Organized motion in turbulent flow // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1981. Vol. 13. P. 457–515.
20. **Russell S.J.** Measured wall pressure signatures of turbulence producing structures // *Proc. of Int. Symp. on Seawater Drag Reduction*, 22–23 July 1998, Newport, Rhode Island. Naval Undersea Warfare Center. P. 63–71.

*Статья поступила в редакцию 7 декабря 2017 г.*