

УДК 532.517.4

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДАТЛИВЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТРЕНИЯ\***

**Б.Н. СЕМЕНОВ, А.И. АМИРОВ, В.М. КУЛИК, А.Г. МАЛЮГА**

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

Представлены результаты измерения турбулентного трения для девяти вариантов однослойных податливых покрытий в сравнении с полированной твердой поверхностью при обтекании водным потоком. Выполнены три серии опытов, сильно разнесенные по времени, прошедшему после изготовления покрытий. Приведены результаты мониторинга вязкоупругих свойств материалов (из которых изготовлены покрытия), позволяющие анализировать влияние старения покрытий как фактор нестабильности их гидродинамической эффективности.

### **ВВЕДЕНИЕ**

До сих пор проблематична стабильность результатов в исследованиях снижения турбулентного трения податливыми покрытиями. Уже в первых опытах Крамера [1] — автора этого метода снижения сопротивления — было обнаружено влияние качества потока на величину эффекта. Как показали наши эксперименты, влияние может быть очень значительным [2]. Так, в опытах на всплывающей модели, испытанной в штить на озере Иссык-Куль, было зафиксировано снижение турбулентного трения податливым покрытием “лабораторной схемы” на 44 %. Это же покрытие, испытанное через полгода при такой же скорости потока в гидролотке, уменьшило трение лишь на 14 %.

Сложность “столбиковых” и “ребристых” покрытий Крамера, сильная чувствительность покрытий “лабораторной схемы” к градиенту давления (вызывающему переток жидкости-наполнителя внутри покрытия под покрывающей пленкой и, как следствие, бугристость поверхности) не позволили выполнить исследования влияния качества потока. Даже повтор опытов другими исследователями на своих стендах был проблематичным. Последующим важным шагом стало упрощение схемы податливого покрытия — переход к облицовке обтекаемой поверхности тонким слоем вулканизированной резины. Такие (однослойные) покрытия имеют несколько меньшую эффективность: они позволили снизить турбулентное трение на 20 % при испытаниях в открытом водоеме в штить [2]. Зато здесь обеспечен постоянный контроль колебательных характеристик покрытия (т. е. обеспечен контроль повторяемости свойств покрытий), отсутствует влияние градиента давления на податливую поверхность.

Были выполнены сравнительные испытания двух однослойных покрытий (изготовленных в ИТ СО РАН) на озере Иссык-Куль и в кавитационной трубе в Ньюкасле (Англия) [3]. Различия в результатах значительные. Причем покрытие, лучшее

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Отдела научных исследований ВМФ США (№ 000140210743).

(в смысле снижения трения) при буксировке в открытом водоеме, оказалось худшим при испытаниях в кавитационной трубе. И наоборот: покрытие, почти не изменившее турбулентное трение при буксировке, уменьшило его на 7 %, а турбулентные пульсации давления на обтекаемой поверхности — на 19 % при испытаниях в кавитационной трубе. Согласно теории интерференционного воздействия податливой границы на пристенную турбулентность [2, 4], причиной тому может быть сильное различие спектров пульсаций давления на обтекаемой поверхности (деформирующей податливую границу, то есть действующего начала явления) в открытом водоеме и в кавитационной трубе. Новый цикл описываемых здесь экспериментов, спонсированных Отделом исследований ВМФ США, направлен на дальнейшее исследование причин нестабильности действия податливых покрытий на турбулентное трение и, прежде всего, на старение покрытий.

#### МЕТОДИКА И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Новый цикл гидродинамических исследований выполнялся параллельно в ИТ СО РАН и лабораториях США и Англии, используя однослойные покрытия, разработанные и изготовленные в ИТ СО РАН. Податливые покрытия располагались на сменной цилиндрической вставке внешним диаметром 76,2 мм и длиной 300 мм (покрытие длиной 282 мм), находящейся на хорошо обтекаемой модели. Длина модели 835 мм. Цилиндрической вставке с покрытием предшествует носовая часть длиной 260 мм, представляющая собой полуэллипсоид вращения (с соотношением его длины к радиусу миделя 4:1), состыкованный с цилиндром диаметром 76,2 мм. Продольная сила, действующая на вставку, измеряется тензовесами, размещенными внутри нее. Эта часть модели со вставкой расположена в зоне безградиентного течения при нулевом избыточном гидродинамическом давлении, поэтому тензовесами измеряется ее сопротивление трения. Как показал расчетный анализ, обтекание вставки близко течению около пластины. В качестве эталона используется сменная вставка с полированной металлической поверхностью. Датчики для измерения пульсаций давления на стенке и ее вибраций расположены непосредственно после вставки. Опыты проводились как без дополнительной турбулизации пристенного течения, так и при наличии кольцевого турбулизатора диаметром 0,8 мм, установленного на расстоянии 140 мм от носовой кромки. Здесь описываются гидродинамические исследования на модели с покрытием, выполненные в гидродинамической трубе ИТ СО РАН при скоростях потока  $U_0 = 1,5-5,7$  м/с. Поперечное прямоугольное сечение рабочего участка гидродинамической трубы 750×250 мм. Его длина 2,7 м. Модель устанавливалась в средней части и по оси (по потоку) рабочего участка.

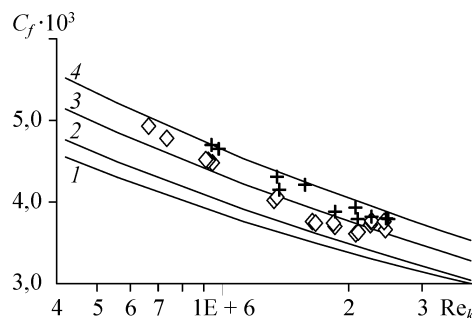
Два из трех изготовленных одинаковых комплектов податливых покрытий были отправлены в США и Англию. На вибрационном стенде ИТ СО РАН двухпараметрическим методом [5] выполнялся мониторинг вязкоупругих свойств вулканизатов, использованных для податливых покрытий. Это позволило оценить влияние старения материалов на определяемые расчетом [6] колебательные характеристики покрытий, используемые при анализе.

#### ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТВЕРДОГО ЭТАЛОНА

Предварительно были выполнены аттестационные измерения трения и флуктуаций давления на стенке для эталона. Отметим, что измерения трения для эталона проводились также перед и после каждой серии гидродинамических опытов для покрытий. При этом наблюдалась хорошая повторяемость результатов для эталона. На рис. 1 представлены данные измерений коэффициента трения в одной из серий опытов. Величина значка соответствует погрешности результата. Отметим,

Рис. 1. Сравнение измеренных коэффициентов трения гладкой твердой цилиндрической вставки (без турбулизатора — +, с турбулизатором — ♦) с расчетными значениями турбулентного трения.

Расчетные линии: 1 — по формуле Шульц-Грунова, 2 — по формуле Прандтля; 3, 4, — с учетом турбулентности потока  $\varepsilon$ :  $C_f = C_{f0} (1 + 2\varepsilon)$ , где  $C_{f0}$  — по формуле Прандтля,  $\varepsilon = 0,04$  (3),  $0,08$  (4).



что трение на эталонной цилиндрической вставке было несколько меньше при наличии турбулизатора, чем без него. Эти экспериментальные данные сравниваются с известными расчетными значениями турбулентного трения, принимая во внимание также уровень турбулентности потока  $\varepsilon$  в водном туннеле. Число Рейнольдса  $Re_k$  записано здесь для концевой абсциссы измерительного участка  $x_k = 0,56$  м. Экспериментальные результаты в опытах без турбулизатора укладываются в полосу, соответствующую  $0,04 < \varepsilon < 0,08$ .

Данные измерений частотных спектров флуктуаций давления на стенке эталона не представлены в статье из-за их громоздкости. Они подробно изложены в Итоговом отчете НИР [7]. Отметим, что измеренные спектры флуктуаций давления в гидротрубе резко отличаются от спектров, измеренных при буксировке моделей в открытом водоеме [2]. При штилевых условиях в открытом водоеме резкое пиковое отклонение от плавного распределения спектральной плотности флуктуаций давления (обусловленное колебаниями всей модели) наблюдалось только в области очень низких частот ( $f \sim 14$  Гц). Причем для реализованных скоростей буксировки  $U_0 \geq 7$  м/с безразмерная частота этого пика  $\bar{f} < 0,0006$ , что много меньше безразмерных частот основного порождения турбулентности, поэтому значение частоты пика не может быть существенным для рассматриваемой задачи. Здесь  $\bar{f} = \pi f v / v_d^2$ , где  $v$  — коэффициент кинематической вязкости,  $v_d$  — динамическая скорость. При опытах в гидротрубе наблюдается большое количество пиков спектральной плотности, обусловленных систематическим влиянием работы винта, вибрации стенок трубы и модели. Причем для сравнительно низких скоростей потока в этих опытах вершины пиков оказываются вблизи и в зоне основного порождения турбулентности. Использование турбулизатора приводит к изменению спектра флуктуаций давления, разным для различных скоростей потока.

#### СОЗДАНИЕ ПОКРЫТИЙ, МОНИТОРИНГ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Ранее (в 80-х годах XX века) были созданы и исследованы однослойные монолитные податливые покрытия, снижающие сопротивление для скоростей буксировки моделей (в открытом водоеме) от 6,5 до 18,5 м/с [8]. Теперь, исходя из возможностей лабораторных гидродинамических стендов, потребовались однослойные податливые покрытия, снижающие сопротивление при скоростях потока от 2 до 6 м/с, т. е. покрытия, обладающие податливостью на порядок большей, чем прежде.

Материаловедческий поиск и разработка технологии изготовления новых покрытий для решения этой задачи были начаты в начале 90-х годов XX века при подготовке лабораторных гидродинамических исследований, выполнявшихся в кавитационной трубе университета в Ньюкасле (Англия) в 1994 году [3].

Таблица 1

Плотность материалов покрытий

Материал	2	2F	3	3A	3Ag	5
$\rho_0, \text{г/см}^3$	2,14	1,89	2,14	2,14	1,75	1,00

Учитывая результаты прежних материаловедческих поисков, рассматривались, в основном, материалы, изготовленные на основе силиконовых каучуков. Температура стеклования силиконовых материалов очень низкая ( $T_g = -133^\circ\text{C}$ ), что позволяет иметь обширное частотное плато вязкоупругих свойств при нормальной температуре эксплуатации покрытий. Чтобы добиться резкого увеличения податливости покрытий (в диапазоне все тех же сравнительно малых их толщин), необходимо обеспечить соответствующее уменьшение модуля упругости материалов. Для этого был избран путь уменьшения степени сшивки (вулканизации) используемых каучуков. При этом, однако, натолкнулись на усиление процессов старения материалов, в связи с чем пришлось искать средства для стабилизации (во времени) вязкоупругих свойств вулканизатов. Это потребовало некоторого изменения состава компаундов, что привело к изменению плотности вулканизатов (см. табл. 1). В результате из большого числа рассмотренных материалов были выбраны четыре силиконовых материала (2F, 3A, 3Ag, 5) для изготовления податливых покрытий.

Все полимерные материалы стареют: модуль упругости увеличивается, а коэффициент потерь уменьшается с течением времени. Это неизбежный процесс. Поэтому мониторинг вязкоупругих свойств выбранных материалов выполнялся в течение длительного времени, чтобы иметь возможность оценивать колебательные характеристики покрытия на момент проведения гидродинамических опытов. Результаты измерений представлены для нескольких промежутков времени  $t$  после изготовления образцов: для квазиравновесного модуля Юнга  $E_\infty$  (в табл. 2), для зависимости модуля упругости  $E$  и коэффициента потерь  $\eta$  от частоты вынужденных колебаний  $f$  (рис. 2–4). Все данные приведены для температуры  $T = 20^\circ\text{C}$ .

Материал 2F — это модифицированный материал 2, который прежде использовался в гидродинамических экспериментах на буксируемых моделях для снижения трения при высоких скоростях буксировки [8]. Вязкоупругие свойства материала 2 слабо изменялись в течение 4 лет, затем происходило его быстрое старение. Стабилизировать материал 2F пока не удалось. Приведенные данные свидетельствуют о довольно быстром его старении, продолжавшемся в течение всего периода наблюдений от 6 до 136 дней.

Материалы 3A и 3Ag — это модификации материала 3, который использовался в лабораторных гидродинамических экспериментах (для покрытия N1 в [3]). Вариант 3A старел очень быстро, и его испытания были приостановлены. Основное внимание было уделено здесь стабилизированному материалу 3Ag, для которого мониторинг изучения вязкоупругих свойств продолжался 493 дня. Отметим, что для этого материала модуль упругости много меньше по сравнению с вариантом 3A

Таблица 2

Квазиравновесный модуль Юнга материалов для покрытий

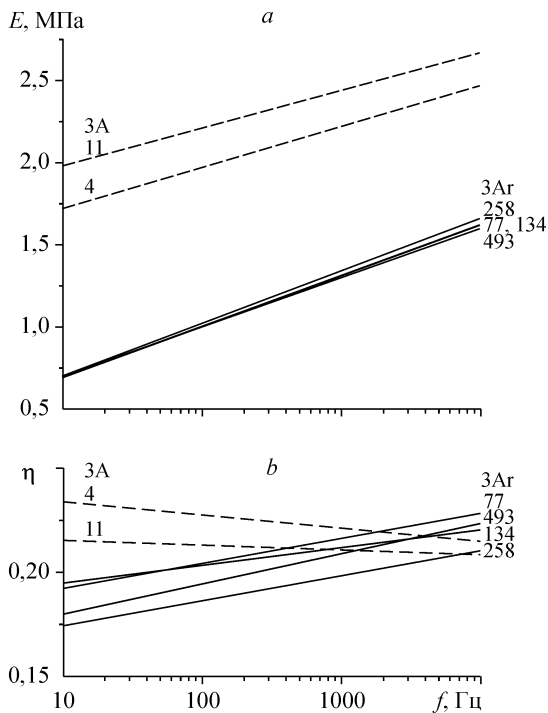
Материал	2F	2F	2F	2F	3A	3A	3Ag	3Ag	5	5	5
$t$ , дни	6	13	46	136	4	11	77, 134, 258	493	25	57	95
$E_\infty$ , МПа	0,61	0,68	0,97	0,98	1,47	1,75	0,38	0,40	0,88	1,05	1,13

Рис. 2. Влияние старения материала 2F на зависимость модуля упругости (а) и коэффициента потерь (b) от частоты вынужденных колебаний.

(ср. данные на рис. 3). Поэтому ему было отдано предпочтение при выборе варианта для изготовления покрытий для лабораторных гидродинамических опытов.

Материал 5 — новый для подобных исследований (см. рис. 4, тонкими линиями показан разброс экспериментальных данных). Видим, что он стареет весьма быстро. Но этот материал привлекателен, поскольку его упругий модуль несколько уменьшается, а коэффициент потерь увеличивается с повышением частоты колебаний. Этот материал — первая удача в разработке монолитных покрытий с постоянной вязкостью. Согласно теоретическим оценкам, монолитные покрытия с постоянной упругостью и вязкостью могут иметь такую же высокую эффективность в снижении сопротивления, как и податливые покрытия “лабораторной схемы” [2].

Следующий шаг в работе — это выбор толщины покрытия по данным измерений вязкоупругих свойств материала. Существующая теория [4] не позволяет рассчитывать величину снижения сопротивления. Но она позволяет определить



толщину однослойного покрытия и диапазон скоростей водного потока, соответствующий возможности снижения сопротивления с помощью этого покрытия. Из материала 2F для опытов в водном туннеле были изготовлены покрытия толщиной  $H = 7$  мм. Предсказываемый диапазон скоростей потока воды, соответствующий возможности снижения сопротивления, соответствует следующим значениям: для  $t = 6$  дней  $2,15 \text{ м/с} < U_0 < 5,75 \text{ м/с}$ , для  $t = 136$  дней  $2,3 \text{ м/с} < U_0 < 6,3 \text{ м/с}$  (для абсциссы

Рис. 3. Влияние старения материалов 3А и 3Аг на зависимость модуля упругости (а) и коэффициента потерь (b) от частоты вынужденных колебаний.

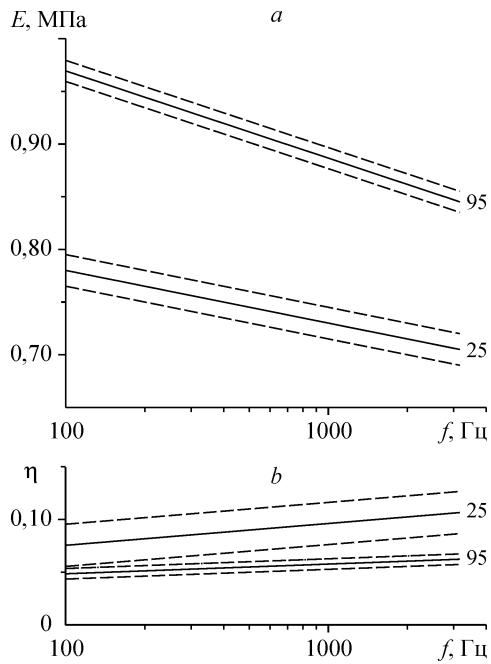


Рис. 4. Влияние старения материала 5 на зависимость модуля упругости (а) и коэффициента потерь (б) от частоты вынужденных колебаний.

начала покрытия  $x_0 = 0,3$  м). Из стабилизированного материала 3Ag для гидродинамических опытов были изготовлены покрытия толщиной 5 и 6 мм. Прогнозируемые диапазоны скоростей потока воды, соответствующие возможности снижения сопротивления, для  $t = 77$  дней  $2,6 \text{ м/с} < U_0 < 6,7 \text{ м/с}$  ( $H = 5$  мм) и  $2,3 \text{ м/с} < U_0 < 6,0 \text{ м/с}$  ( $H = 6$  мм).

Самое большое количество (шесть) вариантов покрытий было изготовлено из материала 5:  $H = 2, 2,5, 3, 4, 5, 7$  мм. Прогнозируемые диапазоны скоростей потока воды, соответствующие возможности сни-

жения сопротивления (для  $x_0 = 0,3$  м), здесь следующие:

- для  $t = 25$  дней  $3,9 \text{ м/с} < U_0 < 8,9 \text{ м/с}$  (2 мм),  
 $3,5 \text{ м/с} < U_0 < 8,2 \text{ м/с}$  (2,5 мм),  
 $3,2 \text{ м/с} < U_0 < 7,6 \text{ м/с}$  (3 мм),  
 $2,8 \text{ м/с} < U_0 < 6,8 \text{ м/с}$  (4 мм),  
 $2,4 \text{ м/с} < U_0 < 6,3 \text{ м/с}$  (5 мм),  
 $2,0 \text{ м/с} < U_0 < 5,5 \text{ м/с}$  (7 мм);
- для  $t = 57$  дней  $4,1 \text{ м/с} < U_0 < 8,7 \text{ м/с}$  (2 мм),  
 $3,7 \text{ м/с} < U_0 < 8,0 \text{ м/с}$  (2,5 мм),  
 $3,4 \text{ м/с} < U_0 < 7,4 \text{ м/с}$  (3 мм),  
 $2,9 \text{ м/с} < U_0 < 6,6 \text{ м/с}$  (4 мм),  
 $2,6 \text{ м/с} < U_0 < 6,1 \text{ м/с}$  (5 мм),  
 $2,2 \text{ м/с} < U_0 < 5,4 \text{ м/с}$  (7 мм);
- для  $t = 95$  дней  $4,1 \text{ м/с} < U_0 < 7,8 \text{ м/с}$  (2 мм),  
 $3,7 \text{ м/с} < U_0 < 7,3 \text{ м/с}$  (2,5 мм),  
 $3,4 \text{ м/с} < U_0 < 6,7 \text{ м/с}$  (3 мм),  
 $2,9 \text{ м/с} < U_0 < 6,0 \text{ м/с}$  (4 мм),  
 $2,6 \text{ м/с} < U_0 < 5,55 \text{ м/с}$  (5 мм),  
 $2,2 \text{ м/с} < U_0 < 4,9 \text{ м/с}$  (7 мм).

#### ИЗМЕРЕНИЕ ТРЕНИЯ ПОДАТЛИВЫХ ПОКРЫТИЙ

Гидродинамические испытания податливых покрытий выполнялись при температуре воды в водном туннеле в диапазоне от 17 до 21 °С при вариации скорости потока от 1,5 до 5,7 м/с. Были проведены три серии опытов, значительно разнесенные во времени  $t$ , отсчитываемом от даты изготовления покрытия. Во всех трех сериях опыты выполнялись при наличии кольцевого проволочного турбулизатора. Во второй серии — и без дополнительной турбулизации пристенного течения. Результаты измерений представлены на рис. 5–7. На них показана процентная

эффективность  $\Psi$  (изменение трения) влияния податливого покрытия на трение в зависимости от скорости потока  $U_0$ , где  $\Psi \% = 100 \% (1 - C_{fc}/C_f)$ . Здесь  $C_{fc}$  — коэффициент трения, измеренный для податливого покрытия,  $C_f$  — измеренный для гладкого твердого эталона в тех же условиях (при той же скорости и температуре потока, при наличии или отсутствии турбулизатора). Отрицательная эффективность соответствует увеличению сопротивления, а положительная — снижению сопротивления. Погрешность приведенных результатов для  $\Psi$  составляет  $\pm 3,5 \%$ .

Теперь прокомментируем результаты опытов.

На рис. 5 приведены данные гидродинамических испытаний однослойного податливого покрытия из материала 2F толщиной 7 мм. Согласно расчетным прогнозам, свежее такое покрытие (прогноз для  $t = 6$  дней) может снижать турбулентное трение в диапазоне скоростей потока от 2,15 до 5,75 м/с. Результаты испытаний свежего покрытия (первая серия опытов,  $t = 4$  дня (см. рис. 5)), хорошо согласуются с расчетным прогнозом. Следует отметить, что при  $U_0 = 1,5$  м/с, меньшей нижнего расчетного скоростного предела возможности снижения трения этим покрытием, появляется увеличение турбулентного трения на  $\sim 7 \%$ . Во всем расчетном скоростном диапазоне возможности снижения трения наблюдалось снижение сопротивления. Максимальное же снижение турбулентного трения ( $\Psi = 17,6 \%$ ) измерено при скорости потока 5,7 м/с вблизи верхнего расчетного предела.

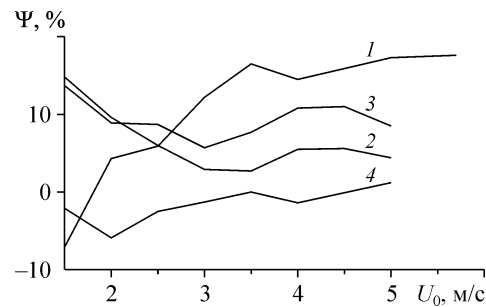
Максимальное время старения образца из материала 2F при измерении его вязкоупругих свойств составило 136 дней. Согласно расчетным прогнозам, однослойное покрытие толщиной 7 мм из состаренного материала может снижать турбулентное трение в диапазоне скоростей потока от 2,3 до 6,3 м/с. С этим прогнозом можно сопоставить результаты второй серии гидродинамических опытов, проведенных при  $t = 105$  дней (см. рис. 5). Отметим, что результаты опытов с турбулизатором и без него довольно близки (различия в пределах погрешности измерений). Снижение трения наблюдалось во всем диапазоне скоростей этих опытов от 1,5 до 5 м/с. Причем даже при скорости 1,5 м/с (что меньше нижнего расчетного предела) оно составило  $\sim 14 \%$ .

В третьей серии опытов, проведенных после старения покрытия до 253 дней, наблюдается резкое ухудшение способности этого покрытия к снижению сопротивления. Однако прокомментировать эти факты нет возможности, поскольку из-за разрушения образца материала 2F исследование не могло быть продолжено.

На рис. 6 приведены результаты гидродинамических испытаний двух покрытий из материала 3Ag толщиной 5 (а) и 6 (б) мм. Напомним, что этот материал — модификация материала 3, который ранее успешно использовался в опытах для снижения турбулентного трения (покрытие N1 [3]). Модификация была направлена на уменьшение старения материала, на стабилизацию вязкоупругих свойств в течение длительного времени. Стабилизация была достигнута. Но покрытия из стабилизированного материала

Рис. 5. Зависимость изменения трения от скорости потока в опытах с турбулизатором (толстые линии 1, 3, 4) и без турбулизатора (тонкая линия 2) для однослойного податливого покрытия из материала 2F толщиной  $H = 7$  мм при вариации времени старения вулканизата.

$t = 4$  (1), 105 (2, 3), 253 (4) дней.



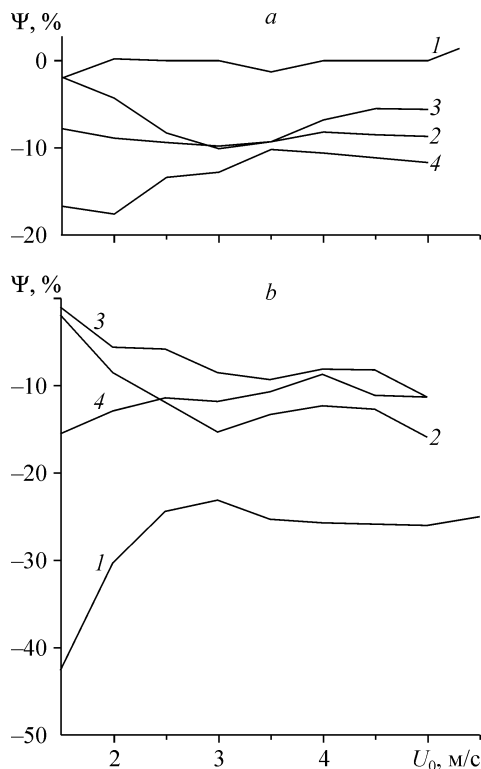


Рис. 6. Зависимость изменения трения от скорости потока в опытах с турбулизатором (толстые линии 1, 3, 4) и без турбулизатора (тонкая линия 2) для однослойного податливого покрытия из материала 3Ag толщиной 5 (а) и 6 (b) мм при вариации времени старения вулканизата:

а —  $t = 18$  (1), 201 (2, 3), 333 (4) дней;  
 б —  $t = 127$  (1), 163 (2, 3), 359 (4) дней.

только увеличили трение, причем результаты практически одинаковы для опытов с турбулизатором и без него. Возможно, что одна из причин этого — в сильном росте модуля упругости с увеличением частоты для модифицированного материала, что приводит к резкому усилению роли низкочастотных флуктуаций давления (вне зоны положительного интерференционного действия покрытия на пристенную турбулентность). Другая причина — появление ползущих деформаций обтекаемой поверхности при стабильных низкочастотных на-

грузках, приводящих к нарастанию трения в процессе опытов до значений, указанных на рис. 6, а, б.

На рис. 7 — данные гидродинамических испытаний шести покрытий из материала 5 толщиной 2 (а), 2,5 (б), 3 (с), 4 (д), 5 (е) и 7 (ф) мм. Впервые были испытаны однослойные податливые покрытия с резко выраженными резонансными колебательными характеристиками. Приведенные прогнозные расчеты диапазонов скоростей возможного снижения сопротивления выполнялись по методике, до сих пор апробированной лишь на однослойных покрытиях из материалов в зоне плато вязкоупругих свойств с высокими механическими потерями. Поэтому здесь эти расчеты имели ориентировочный характер при выборе толщины покрытия для опытов и в дальнейшем подлежат ревизии.

Сейчас же отметим появление важной тенденции к снижению сопротивления для покрытий из материала 5, следующую из этих опытов. Лучшие результаты здесь получены для более тонких покрытий. Кроме того, старение материала 5 оказалось фактором неоднозначного действия в достижении снижения сопротивления, не похожим на прежние наблюдения [5], когда старение материала всегда вело к ухудшению результатов снижения сопротивления.

Первые гидродинамические испытания покрытия толщиной 2 мм были выполнены лишь после довольно большого времени старения ( $t = 192$  дня). При этом снижение трения  $\Psi$  наблюдалось при всех скоростях потока. Причем эффективность  $\Psi$  нарастала с увеличением скорости и составила  $\sim 17\%$  при скорости 5,3 м/с (см. рис. 7, а). С увеличением времени старения до 368 дней в опытах с турбулизатором снижение трения этим покрытием также наблюдалось при всех скоростях потока, но со спадом эффективности от 17 % при  $U_0 = 1,5$  м/с до 4 % при  $U_0 = 5$  м/с. В опытах без турбулизатора (для  $t = 368$  дней) картина похожая, но со сдвигом эффективности вниз. С увеличением времени старения до 501 дня



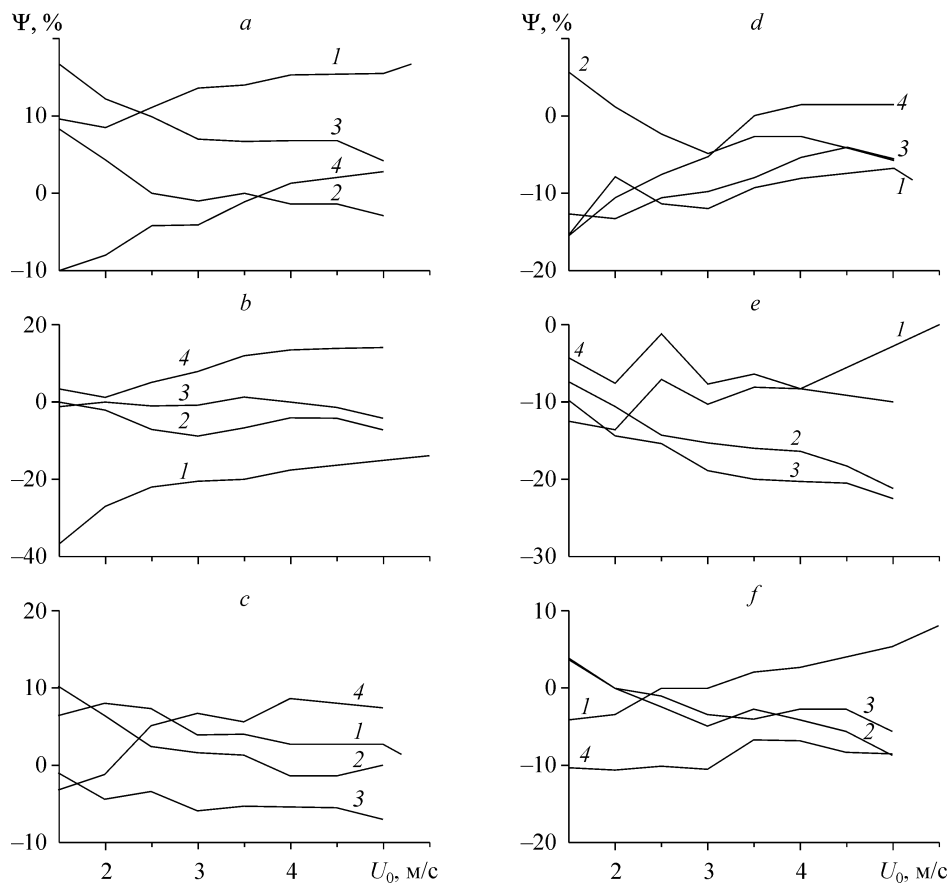


Рис. 7. Зависимость изменения трения от скорости потока в опытах с турбулизатором (толстые линии 1, 3, 4) и без турбулизатора (тонкая линия 2) для однослойного податливого покрытия из материала 5 толщиной 2 (а), 2,5 (b), 3 (с), 4 (d), 5 (e), 7 (f) мм при вариации времени старения вулканизата:

а —  $t = 192$  (1), 368 (2, 3), 501 (4) дней;

б —  $t = 19$  (1), 85 (2, 3), 249 (4) дней;

с —  $t = 37$  (1), 151 (2, 3), 312 (4) дней;

д —  $t = 37$  (1), 61 (2, 3), 279 (4) дней;

е —  $t = 13$  (1), 181 (2, 3), 317 (4) дней;

ф —  $t = 57$  (1), 184 (2, 3), 353 (4) дней.

картина изменилась: эффективность покрытия нарастала от отрицательных значений при малых скоростях ( $\Psi = -10\%$  при  $U_0 = 1,5$  м/с) к положительным при больших скоростях ( $\Psi = +3\%$  при  $U_0 = 5$  м/с).

В опытах с турбулизатором свежее (19 дней) покрытие толщиной 2,5 мм увеличило трение при всех скоростях потока, причем при скорости  $\sim 1,5$  м/с оно составило  $\sim 37\%$  (см. рис. 7, б). Покрытие, состаренное до 85 дней, почти не меняло сопротивления, тогда как состаренное до 249 дней снизило сопротивление при всех скоростях потока, причем наиболее значительно (на  $\sim 14\%$ ) при скоростях более 4 м/с.

В опытах с турбулизатором свежее ( $t = 37$  дней) покрытие толщиной 3 мм уменьшало сопротивление при всех скоростях потока (см. рис. 7, с). Покрытие, состаренное до 151 дня, увеличило сопротивление во всех скоростных режимах, однако состаренное до 312 дней, немного увеличивая трение при малых скоростях до 2 м/с, снизило его на  $\sim 9\%$  при скоростях потока более 3,5 м/с. В опытах без турбулизатора снижение трения наблюдали для  $t = 151$  день при  $U_0 = 3,5$  м/с.

Покрытие толщиной 4 мм в опытах с турбулизатором дало увеличение трения для  $t = 36$  и 61 день при всех скоростях потока, но для  $t = 279$  дней привело к небольшому снижению сопротивления ( $\sim 1,5\%$ ) при скоростях потока более 3,5 м/с (см. рис. 7, *d*). Отметим, что в опытах без турбулизатора снижение трения  $\sim 5\%$  наблюдалось для  $t = 61$  день при малых скоростях потока.

Покрытие толщиной 5 мм во всех трех сериях опытов (для  $t = 13, 181$  и 317 дней) привело только к увеличению сопротивления (см. рис. 7, *e*).

В опытах для сравнительно свежего покрытия толщиной 7 мм ( $t = 57$  дней) наблюдалось снижение сопротивления  $\sim 8\%$  (см. рис. 7, *f*). Для этого покрытия, состаренного до 184 дней, небольшое снижение трения  $\sim 4\%$  наблюдалось лишь при малой скорости потока ( $\sim 1,5$  м/с), а при скоростях более 2 м/с — только увеличение сопротивления. Причем результаты близки для опытов с турбулизатором и без него. Покрытие, состаренное до 353 дней, увеличило трение на  $\sim 10\%$  практически во всех скоростных режимах.

Пока нет достаточно строгого расчетного обоснования такого разнообразия результатов для покрытий из материала 5. Можно лишь предполагать, что оно связано с усилением резонансных качеств колебания покрытий при старении материала и специфическим спектром флуктуаций давления на поверхности модели, содержащим высокие пики.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим наиболее важные результаты:

1. Полученная информация свидетельствует о сильном влиянии старения однослойных податливых покрытий на их гидродинамическую эффективность. Причем старение материала оказалось фактором неоднозначного действия в достижении снижения сопротивления, не адекватным прежним наблюдениям [5], когда старение материала всегда вело к ухудшению результатов снижения сопротивления.

2. Показано, что при использовании материалов в зоне плато вязкоупругих свойств с достаточно большими механическими потерями расчетные прогнозы к выбору характеристик податливого покрытия и диапазона скоростей возможного снижения турбулентного трения справедливы также для опытов в гидродинамической трубе.

3. Одним из необходимых условий (не упоминавшимся ранее) для достижения снижения сопротивления является отсутствие ползущих деформаций покрытия.

4. Впервые показана возможность снижения турбулентного трения (при опытах в гидродинамической трубе) однослойными податливыми покрытиями с резко выраженными резонансными колебательными характеристиками. При этом лучшие результаты в снижении сопротивления получены для более тонких состаренных покрытий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kramer M.O.** Boundary layer stabilization by distributed damping // *Navy Eng. J.* — 1962. — Vol. 74, No. 2. — P. 341–348.
2. **Амфилохий В.Б., Артюшков Л.С., Барбанель Б.А., и др.** Современное состояние теории управления пограничным слоем. — С.-П.: ГУП СПМБМ “Малахит”, 2000. — 415 с.
3. **Choi K.S., Yang X, Clayton B.R., Glover T, Atlar M., Semenov B.N., Kulik V.M.** Turbulent drag reduction using compliant coatings // *Proc. of Royal Society.* — 1997. — Vol. 453. — P. 2229–2240.
4. **Semenov B.N.** On conditions of modeling and choice of viscoelastic coatings for drag reduction // *Recent Developments in Turbulence Management.* — Kluwer, 1991. — P. 241–262.

5. **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.
6. **Semenov B.N.** Analysis of four types of viscoelastic coatings for turbulent drag reduction // *Ibid.* — 1996. — P. 187–206.
7. **Семенов Б.Н., Амиров А.И., Кулик В.М., Малых Н.В., Малюга А.Г., Семенова А.В.** Итоговый отчет международной НИР (спонсированной Отделом научных исследований ВМФ США) «Экспериментальные исследования податливых покрытий для снижения турбулентного трения». — Новосибирск: ИТ СО РАН, 2004. — 95 с.
8. **Кулик В.М., Погуда И.С., Семенов Б.Н.** Экспериментальное исследование воздействия однослойных вязкоупругих покрытий на турбулентное трение и пульсации давления на стенке // *Инж.-физ. журн.* — 1984. — Т. 47, № 2. — С. 189–196.

*Статья поступила в редакцию 25 мая 2006 г.*