

УДК 532.526

## **СНИЖЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПУТЕМ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДАТЛИВОГО ПОКРЫТИЯ, ГАЗОВЫХ МИКРОПУЗЫРЬКОВ И ПОЛИМЕРНЫХ ДОБАВОК**

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

*Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск*

Показано, что в случае совместного воздействия податливого покрытия, газовых микропузырьков и полимерных добавок на пристенную турбулентность в определенном диапазоне расходов воздуха и полимеров общая эффективность снижения турбулентного сопротивления равна алгебраической сумме малых индивидуальных эффективностей. При увеличении индивидуальных эффектов снижение сопротивления при совместном действии превышает их сумму, а далее может быть меньше такой суммы. Проведенный анализ свидетельствует о существовании взаимодействия этих средств управления турбулентностью.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Нанесение вязкоупругих покрытий на обтекаемую поверхность, инъекция газовых микропузырьков и высокомолекулярных полимерных добавок в пристенное течение жидкости — три хорошо известных метода управления турбулентностью в целях снижения турбулентного трения и гидродинамического шума. В настоящее время перечень исследований, проводимых с использованием этих методов, содержит более тысячи наименований. Анализ многих работ можно найти в обзорах [1 – 4]. Идея совместного использования податливых покрытий, газовых микропузырьков и полимерных добавок возникла благодаря успехам исследований, определивших физическую природу воздействия на пристенную турбулентность. В данном случае используется представление о том, что каждое из указанных средств действует лишь в ограниченной области турбулентных структур, в значительной мере отличающихся от таковых, управляемых другими средствами. Податливая поверхность реагирует на длинноволновые возмущения. Согласно интерференционной теории [5] и экспериментальным данным [6], реальные вязкоупругие покрытия деформируются волнами турбулентных флуктуаций давления с длинами более тысячи вязких масштабов. Малые высокомолекулярные полимерные добавки подавляют в потоке микровихревую турбулентность с размерами менее ста вязких масштабов [7]. Текущий пристеночный экран из микропузырьков может разрушать мощные длинноволновые флуктуации, направленные к стенке из турбулентного ядра и внешнего потока [8].

Известно [9, 10], что порождение турбулентности и диссипация энергии потока в основном обусловлены воздействием микровихрей вязкого подслоя и длинноволновых флуктуаций скорости турбулентного ядра. Предполагалось, что совместное использование податливого покрытия, микропузырьков и полимерных добавок позволит уменьшить генерацию пристенной турбулентности практически для всего ее пространственного спектра. Можно было ожидать суммирования малых индивидуальных эффективностей снижения трения

и подавления турбулентных флуктуаций давления на стенке в более широкой полосе частот по сравнению со случаем отдельного использования рассматриваемых средств.

Уже первые эксперименты (выполненные в Институте теплофизики) по снижению сопротивления при совместном использовании податливых покрытий и полимерных добавок [11], газовых микропузырьков и полимерных добавок [12] показали перспективность применения комбинированных вариантов. Было получено, что снижение турбулентного трения в случае совместного использования этих средств может быть равно сумме эффективностей снижения сопротивления при их отдельном применении (т. е. сумме индивидуальных эффективностей).

В настоящей работе описаны и проанализированы результаты впервые поставленного эксперимента по снижению сопротивления при совместном использовании всех трех средств, а также опытов, продолжающих прежние исследования [11, 12].

### УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проводился в условиях открытого водоема с естественной внешней турбулентностью (т. е. при отсутствии судоходства в акватории). Испытываемая модель тела вращения (рис. 1) длиной 2,1 м и диаметром миделя  $D = 175,0$  мм была закреплена на соосной трубе-державке, один конец которой располагался внутри модели, а другой приваривался к стальному полуму ножу подвески, размещенной в носовой части судна-буксировщика и позволяющей регулировать положение модели. Испытания проводились при нулевом угле атаки обтекаемого тела. Заглубление модели (расстояние от оси до свободной поверхности воды) составляло около 0,8 м, расстояние от ее кормового среза до форштевня судна — около 2 м. Измерительные коммуникации и трубопроводы для подвода газа и полимерных растворов к местам эжекции были проложены внутри полости ножа и трубы-державки. Модель состояла из трех частей, разделенных зазорами шириной 0,5–1,0 мм.

Носовая часть представляла собой полуэллипсоид вращения (с соотношением осей 1:4), состыкованный с прямым круглым цилиндром диаметром 175,0 мм. На расстоянии 28 мм от носовой кромки модели была расположена кольцевая щель шириной 0,3 мм для эжекции растворов полимера. Угол наклона щели к образующей модели составлял  $11^\circ$ . В конце носовой части для эжекции газа размещалась пористая вставка шириной 35 мм.

Средняя часть модели (измерительная цилиндрическая вставка диаметром 175,0 мм) — сменная. Она изготавливалась в различных вариантах, один из которых — с твердой гладкой поверхностью, другие — с вязкоупругими покрытиями. Вставка закреплена на тензовесах, измеряющих продольную силу. Эта часть модели (как видно из рис. 1, б) расположена в зоне безградиентного течения при нулевом избыточном гидродинамическом давлении  $P$ , поэтому тензовесами измеряется ее сопротивление трения. Как показывает расчетный анализ [6], обтекание вставки соответствует течению около пластины.

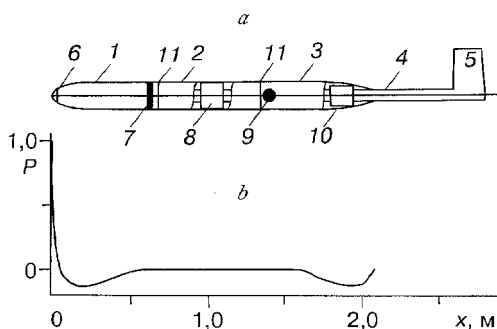


Рис. 1. Схема модели (а) и распределение безразмерного избыточного гидродинамического давления (б).

1 — носовая часть, 2 — измерительная вставка, 3 — кормовая часть, 4 — труба-державка, 5 — нож, 6 — кольцевая щель, 7 — пористая вставка, 8 — тензомер сопротивления измерительной вставки, 9 — пьезодатчик пульсаций давления, 10 — трехкомпонентные тензовесы, 11 — кольцевой зазор.

Непосредственно за вставкой (вблизи передней кромки кормовой части), также в безградиентной зоне, размещен пьезокерамический датчик пульсаций давления (в виброизолированном исполнении) с диаметром чувствительной поверхности 1,2 мм. Внутри кормовой части расположены трехкомпонентные тензосенсоры для измерения сил, действующих на всю модель. В описываемом эксперименте эти тензосенсоры использованы для измерения полного сопротивления модели и для контроля нулевого угла атаки.

В ходе эксперимента было проведено тщательное измерение полного сопротивления, силы трения и пульсаций давления на стенке для случая твердой полированной поверхности при вариации скорости буксировки  $U$  от 7 до 18 м/с. Опыты выполнены как при наличии проволочного турбулизатора диаметром 1,0 мм, расположенного на расстоянии  $x = 25$  мм, так и без него. При этом влияния турбулизатора на сопротивление вставки не обнаружено. Измеренные значения коэффициента трения  $C_f$  соответствуют рассчитанным по формуле Прандтля — Шлихтинга для гладкой пластины [13] при местном числе Рейнольдса, построенном по абсциссе средней точки вставки. Все это характеризует турбулентное течение в рассматриваемой зоне как развитое автомодельное. Измеренные коэффициенты полного сопротивления модели  $C_x$  близки рассчитанным по методу Труккенбротта [13].

Пульсации давления проанализированы в диапазоне частот  $f = 10$  Гц — 10 кГц. Спектральный анализ (рис. 2: пример для скорости  $U = 9$  м/с, безразмерная спектральная плотность указана в децибеллах) выявил резкие пиковые отклонения от плавного распределения спектральной плотности турбулентных пульсаций давления (обусловленные колебаниями всей модели) только в области очень низких частот (до 20 Гц). В данном случае они соответствуют безразмерной частоте  $\bar{f} < 0,0006$  ( $\bar{f} = \pi f v / v_d^2$ , где  $v$  — кинематическая вязкость,  $v_d = U \sqrt{C_f / 2}$  — динамическая скорость), много меньшей частот основного порождения турбулентности, и не могут быть существенны для рассматриваемой задачи.

Вышеупомянутые значения  $C_f(U)$ ,  $C_x(U)$  использованы для определения изменения трения  $\psi_k = 1 - C_{fk} / C_f$  и полного сопротивления  $\psi_{xk} = 1 - C_{xk} / C_x$  при применении различных способов управления турбулентностью. Индекс  $k$  принимает следующие значения:  $A$  — при инъекции воздушных микропузырьков в пограничный слой около твердой границы,  $C$  — при применении податливого покрытия,  $P$  — при инъекции полимерных растворов в пограничный слой около твердой границы,  $AC$  — при совместном использовании воздушных микропузырьков и податливого покрытия,  $CP$  — при совместном использовании полимерных добавок и податливого покрытия,  $AP$  — при совместном использовании воздушных микропузырьков и полимерных добавок около твердой границы,  $ACP$  — при совместном использовании податливого покрытия, воздушных микропузырьков и полимерных добавок.

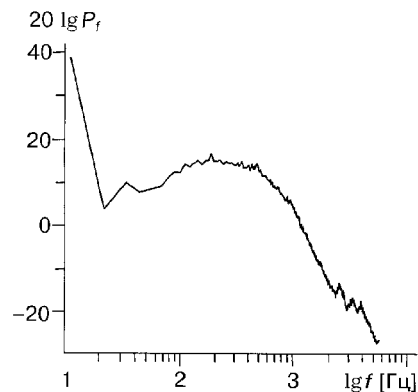


Рис. 2. Безразмерный спектр пульсаций давления за твердой полированной вставкой при  $U = 9$  м/с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В эксперименте было использовано гладкое однослойное вязкоупругое покрытие  $A$  толщиной 7 мм из вулканизата кремнийорганической резины № 2-1 (модификации ранее описанного [6] материала № 2) плотностью 2140 кг/м<sup>3</sup>, имеющего квазиравновесный модуль упругости 1,7 МПа. Динамические вязкоупругие свойства (динамический модуль упругости  $E$  и тангенс угла механических потерь  $\eta$ ), измеренные методом вынужденных колебаний [14], приведены на рис. 3 в зависимости от круговой частоты  $\omega$  (для условий проведения гидродинамического эксперимента).

Согласно расчетным прогнозам, следующим из интерференционной теории [5], использованное покрытие при начальной его абсциссе 0,8 м должно снижать турбулентное трение в диапазоне скоростей движения от 3,2 до 12,3 м/с при температуре воды 8 °С и в диапазоне  $U = 3,0 - 11,7$  м/с при  $T = 12$  °С. Гидродинамические испытания покрытия были выполнены при температуре воды в озере  $T = 8,5 - 10,5$  °С для пяти скоростных режимов, начиная от 7 м/с (минимальная возможная скорость движения судна-буксировщика составляет 6,7 м/с). Результаты экспериментов при использовании покрытия  $A$  приведены ниже (здесь помимо  $\psi_C$  и  $\psi_{x,C}$  указаны их среднеквадратичные отклонения (с вероятностью 95 %) и число опытов  $n$ ):

$U, \text{ м/с}$	7,2	8,0	9,0	10,7	11,6
$\psi_C, \%$	$+8,0 \pm 2,6$	$+1,3 \pm 1,3$	$+2,6 \pm 1,0$	$+2,3 \pm 5,3$	$-8,5 \pm 2,1$
$\psi_{x,C}, \%$	$+7,3 \pm 2,6$	$+2,9 \pm 1,7$	$+3,2 \pm 1,6$	$+5,2 \pm 5,5$	$+3,2 \pm 2,1$
$n$	19	30	32	6	6

Отметим, что снижение полного сопротивления модели, имеющей покрытие только на одной трети поверхности, оказалось практически таким же (и даже больше), что и снижение трения полностью облицованной вставки.

Последующие опыты проводились при одной скорости буксировщика 9 м/с. Этот скоростной режим был выбран для того, чтобы обеспечить максимальную стабильность поддержания скорости и минимальную погрешность измерений.

Далее был реализован низкорасходный режим инъекции воздуха через пористую вставку с коэффициентом расхода  $2,2 \cdot 10^{-4} \leq C_A \leq 3,2 \cdot 10^{-4}$  ( $C_A = Q_A / (US)$ , где  $Q_A$  — объемный расход воздуха при нормальном давлении,  $S$  — смоченная поверхность измерительной цилиндрической вставки). При этом размеры микропузырьков, инжектируемых в пристенное течение, находились в диапазоне 70 – 200 мкм. Наблюдалось снижение трения твердой полированной поверхности вставки  $\psi_A$  в диапазоне от  $(7,0 \pm 1,0)$  до  $(10,8 \pm 1,0)$  %, примерно пропорциональное  $C_A$ , уменьшение же полного сопротивления  $\psi_{x,A}$  возрастало от  $(2,0 \pm 2,5)$  до  $(6,3 \pm 0,9)$  %. Значительно большего снижения сопротивления можно добиться при резком увеличении расхода воздуха (из-за нелинейной зависимости эффекта от расхода) [12]. Поэтому реализация максимального снижения сопротивления

дорога и в практическом плане зачастую затруднена. Низкорасходный же режим может быть реализован просто и рентабельно — путем использования выхлопных газов от двигателя. Низкорас-

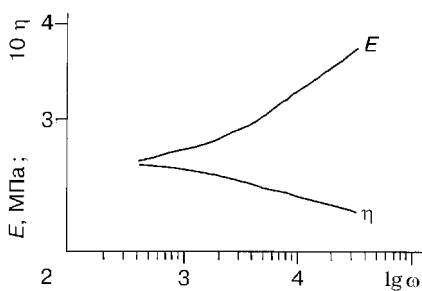


Рис. 3. Зависимость (логарифмическая) модуля упругости  $E$  и коэффициента потерь  $\eta$  от круговой частоты  $\omega$  для материала № 2-1 (покрытие  $A$ ) через 45 дней после изготовления образца при температуре 8 °С.

ходный режим интересен также тем, что уже в этом случае ярко выражены экранирующие свойства тонких микропузырьковых слоев [ 8 ].

В качестве высокомолекулярного полимера, вводимого в поток, использован отечественный полиэтиленоксид (ПЭО) с молекулярной массой 4,5 млн. В данном эксперименте проводилась обычная двухэтапная подготовка инжектируемого раствора.

Вначале из сухого порошка ПЭО в течение суток на лопастной низкооборотной мешалке готовился базовый 1%-й раствор, который может храниться, по крайней мере, две недели (т. е. в течение всего эксперимента) без заметной термоокислительной деструкции полимера. Инжектируемые же растворы с долевой концентрацией  $C = 50, 100, 200$  ppm (часть полимера на миллион частей воды) готовились непосредственно перед опытом разбавлением базового раствора. Результаты эксперимента с инъекцией растворов ПЭО обработаны в виде зависимостей снижения сопротивления от безразмерного коэффициента расхода сухого полимера  $q_\delta = CQ_p / (2\pi U\delta_0 D)$ . Здесь  $Q_p$  — объемный расход раствора с концентрацией  $C$ ,  $\delta_0$  — толщина пограничного слоя посредине цилиндрической вставки. Эта толщина определялась расчетом для гладкой твердой поверхности, обтекаемой потоком без полимерных добавок [13]. Так как турбулентное число Шмидта близко к единице, а инъекция полимерных добавок производилась в носовой части модели, то толщины диффузионного и динамического слоев на измеряемом участке можно полагать примерно равными [15]. В этом случае коэффициент расхода  $q_\delta$  имеет величину одного порядка с пристенной концентрацией полимера в расчетной точке. В эксперименте реализованы очень малые коэффициенты расхода ПЭО:  $1,0 \cdot 10^{-7} \leq q_\delta \leq 4,5 \cdot 10^{-7}$ . С увеличением  $q_\delta$  трение твердой полированной поверхности снижается от  $(3,5 \pm 0,8)$  до  $(11,6 \pm 1,1)$  %, однако темп роста  $\psi_p$  замедляется. В этом же диапазоне  $q_\delta$  зафиксировано уменьшение полного сопротивления модели  $\psi_{xp}$  от  $(15,3 \pm 4,3)$  до  $(29,9 \pm 1,5)$  %. С дальнейшим увеличением расхода полимера уменьшается рентабельность применения данного метода снижения сопротивления [16]. Зависимость снижения турбулентного трения от расхода ПЭО имеет экспоненциальный вид, поэтому максимальная эффективность достигается при высоких, экономически невыгодных расходах полимера. Это обстоятельство и стимулировало проведение исследований совместного действия методов при весьма малых расходах полимера.

Итак, на первом этапе испытаний были охарактеризованы индивидуальные возможности трех методов управления пристенной турбулентностью. Методика последующих испытаний совместного действия методов предусматривала также проверку их индивидуальных возможностей на каждом буксировочном галсе. Большая протяженность испытательной трассы (20 км) позволяла выполнять очень длительные галсы, в течение которых при постоянной скорости изучались различные варианты: вначале выполнялись измерения без инъекции; далее через пористую вставку подавался воздух с заданным расходом  $Q_A$ ; затем добавлялась щелевая инъекция раствора ПЭО с концентрацией  $C$  при расходе  $Q_p$ ; после этого режима прекращалась подача воздуха; далее прекращалась подача полимерного раствора и вновь реализовывался режим без инъекции. Длительность каждого из перечисленных режимов составляла около 90 с. Условия инъекции были одинаковы в опытах с твердой и облицованной вставками модели.

На рис. 4 представлено обобщение результатов измерений снижения трения и полного сопротивления вязкоупругим покрытием при инъекции воздушных микропузырьков и растворов ПЭО. Для удобства идентификации результатов расходные параметры  $C_A$ ,  $q_\delta$ , определяющие снижение трения вставки (рис. 4, а), использованы также и для иллюстрации снижения полного

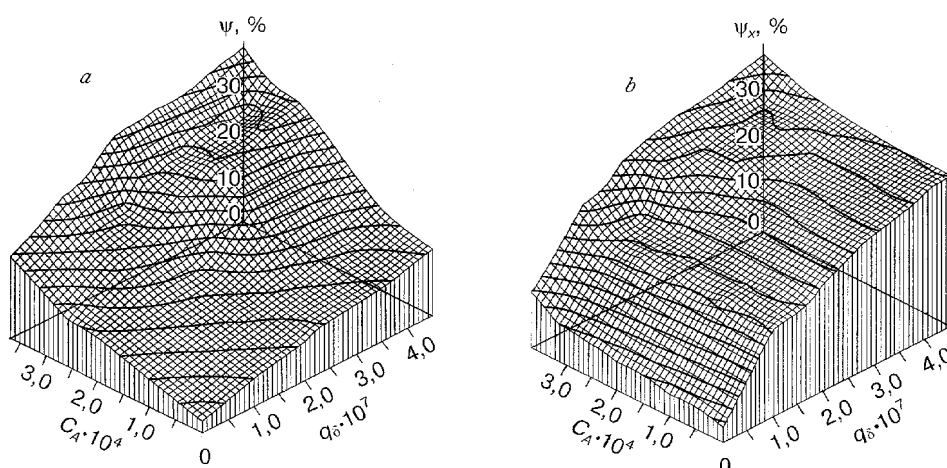


Рис. 4. Зависимость снижения трения на вставке (а) и полного сопротивления модели (б) от коэффициентов расхода ПЭО ( $q_\delta$ ) и воздуха ( $C_A$ ).

$M(\text{ПЭО}) = 4,5$  млн,  $T = 8,5 - 10,5$  °C,  $U = 9$  м/с, покрытие А (из компаунда № 2-1,  $H = 7$  мм).

сопротивления модели (рис. 4, б), однако для практиков более привычны интегральные расходные параметры, отнесенные к смоченной поверхности всей модели. Поэтому отметим, что максимальный совместный эффект снижения полного сопротивления  $\psi_{xCAP} = 38\%$  был достигнут при значениях интегральных коэффициентов расхода газа около  $1,2 \cdot 10^{-4}$  и ПЭО около  $5,4 \cdot 10^{-9}$ .

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты были использованы для оценки корректности исходных представлений о независимом воздействии вязкоупругой границы, газовых микропузырьков и полимерных добавок в потоке на трение. Если индивидуальные возможности снижения сопротивления каждым из рассмотренных методов управления турбулентностью при их совместном использовании проявляются независимо, то эффект совместного действия в принципе должен быть меньше суммы положительных индивидуальных эффектов. Действительно:  $\psi_{CAP} = 1 - (1 - \psi_C)(1 - \psi_A)(1 - \psi_P)$  или  $\psi_{CAP} = (\psi_C + \psi_A + \psi_P) - \psi_C\psi_A - \psi_C\psi_P - \psi_A\psi_P(1 - \psi_C)$ . Тогда  $\psi_{CAP} < \psi_C + \psi_A + \psi_P$  для  $\psi_C > 0$ ,  $\psi_A > 0$ ,  $\psi_P > 0$ . При малых индивидуальных эффектах (т. е. при  $\psi_C \ll 1$ ,  $\psi_A \ll 1$ ,  $\psi_P \ll 1$ ) должна приближенно соблюдаться их аддитивность ( $\psi_{CAP} \cong \psi_C + \psi_A + \psi_P$ ). Аналогичные выводы следуют для трех вариантов совместного использования двух средств управления пристенной турбулентностью. Поэтому при анализе экспериментальных данных целесообразно рассмотреть отклонение эффективности совместного действия от суммы индивидуальных эффективностей.

*Совместное использование покрытия, пузырьков и полимерных добавок.* Из приведенных на рис. 5 данных для совместного действия всех трех методов снижения сопротивления следует вывод о существенном их взаимодействии по крайней мере в области измерительной цилиндрической вставки, при этом снижение трения при совместном действии достигает 35 %, превысив сумму индивидуальных эффективностей на 11 %. Но при отсутствии взаимовлияния этих трех методов отклонение от суммы индивидуальных эффективностей должно быть только отрицательным, достигая значения около  $-2,5\%$ , в силу чего взаимовлияние безусловно имеет место при  $\psi_{CAP} > 16\%$ .

Снижение полного сопротивления при совместном действии трех методов управления пристенной турбулентностью примерно равно сумме индивиду-

Рис. 5. Отклонение эффекта снижения трения на вставке (а) и полного сопротивления модели (б) при совместном использовании податливого покрытия А, газовых микропузырьков и полимерных добавок от суммы индивидуальных эффективностей в зависимости от эффективности совместного действия.

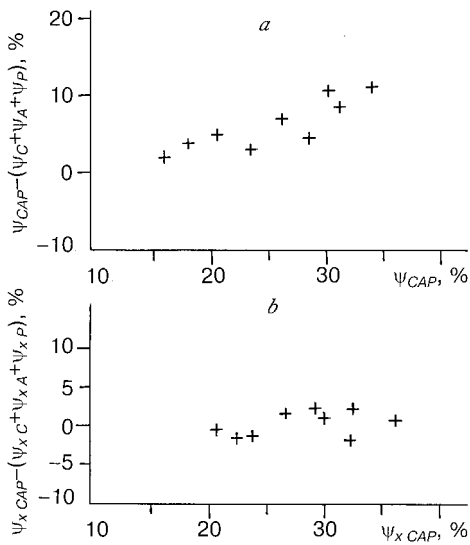
$$T = 8,5 - 10,5 \text{ } ^\circ\text{C}, U = 9 \text{ м/с}, M(\text{ПЭО}) = 4,5 \text{ млн}, \\ 1,5 \cdot 10^{-7} \leq q_\delta \leq 4,5 \cdot 10^{-7}, 2,0 \cdot 10^{-4} \leq C_A \leq 3,7 \cdot 10^{-4}.$$

альных эффективностей вплоть до  $\psi_{xCAP} = 38 \%$ . В этом случае анализ явления заведомо осложняется возможным влиянием градиента давления, а также необходимостью учета изменения восстановления гидродинамического давления в корме и связанного с этим изменением сопротивления формы. Поэтому опытные данные по снижению полного сопротивления далее не рассматриваются.

Итак, с помощью поставленного эксперимента обнаружено увеличение эффективности снижения трения при совместном использовании вязкоупругих покрытий, полимерных добавок и воздушных микропузырьков для  $\psi_{CAP} > 16 \%$ . Этот важный результат интересно сопоставить с наблюдениями совместного применения этих средств попарно.

*Вязкоупругое покрытие и инжекция воздушных микропузырьков в пристенную область течения.* Снижение трения  $\psi_{AC}$  при совместном использовании этих средств близко сумме индивидуальных эффективностей. При изменении коэффициента расхода воздуха  $C_A$  от  $2,0 \cdot 10^{-4}$  до  $3,7 \cdot 10^{-4}$  значение  $\psi_{AC}$  линейно росло от  $(9,6 \pm 1,0)$  до  $(17,7 \pm 1,3) \%$ . Возможное расчетное отклонение от суммы индивидуальных эффективностей снижения трения при отсутствии взаимовлияния ( $-0,4 \%$ ) было бы в этом случае в пределах разброса экспериментальных точек. Поэтому здесь трудно утверждать отсутствие или наличие взаимовлияния методов, однако ясно, что оно мало.

*Инжекция воздушных микропузырьков и растворов ПЭО в течении около твердой гладкой границы.* На рис. 6 сопоставлены результаты описываемого эксперимента с данными прежних опытов [12]. Принципиальное различие тех и других экспериментальных условий состоит в том, что опыты в рассматриваемом случае были выполнены при много меньших расходах ПЭО и воздуха, чем в [12]. При этом в новых экспериментах с ростом расходных параметров отклонение от суммы индивидуальных эффектов увеличивается от  $-2$  до  $+5 \%$ ,



а в прежних, возрастая вначале от  $+7$  до  $+11 \%$ , уменьшалось затем до

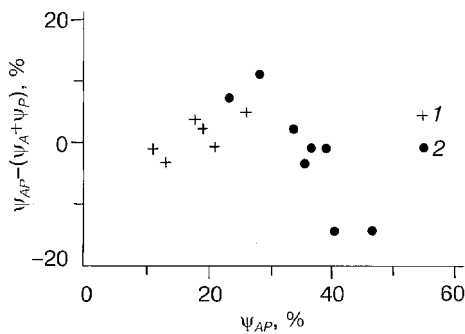


Рис. 6. Отклонение снижения трения на твердой вставке при совместном использовании полимерных добавок и газовых микропузырьков от суммы их индивидуальных эффективностей в зависимости от эффективности совместного действия.

$$1 - U = 9 \text{ м/с}, M(\text{ПЭО}) = 4,5 \text{ млн}, 1,0 \cdot 10^{-7} \leq q_\delta \leq \\ \leq 4,6 \cdot 10^{-7}, 2,3 \cdot 10^{-4} \leq C_A \leq 3,7 \cdot 10^{-4}; 2 - U = 7 \text{ м/с}, \\ \text{WSR-301}, 1,0 \cdot 10^{-6} \leq q_\delta \leq 2,7 \cdot 10^{-6}, 1,36 \cdot 10^{-3} \leq C_A \leq \\ \leq 1,73 \cdot 10^{-3}.$$

–15 %. Пик положительного отклонения соответствует ~ 30%-му снижению трения, имеющему место при совместном действии воздушных микропузырьков и полимерных добавок. При снижении трения  $\psi_{AP} < 20$  %, обусловленном очень малыми расходами ПЭО и газа, по-видимому, реализуется простая аддитивность их действия, но при больших расходах вполне очевидно существование полезного взаимовлияния этих средств.

*Вязкоупругие покрытия и инжекция растворов ПЭО в пристенное течение.* На рис.7 сопоставлены результаты описываемого эксперимента, выполненного при весьма малых расходах ПЭО, с данными прежних опытов (в том числе описанных в [11]), проводившихся в основном при существенно больших расходах полимера. На рис.7, *a* отклонения от суммы индивидуальных взаимодействий показаны (как и выше) в зависимости от эффективности снижения трения при совместном действии. На рис.7, *b* те же данные приведены в зависимости от снижения трения на гладкой твердой поверхности такими же полимерными добавками в потоке, чтобы продемонстрировать роль их индивидуальной эффективности. Отметим также, что здесь приведены результаты для разнообразных покрытий, в том числе и с отрицательной эффективностью (без ввода полимерных добавок). Видно, что для  $\psi_{CP} < 20$  % наблюдается аддитивность индивидуальных эффективностей снижения трения. Оценить существование взаимовлияния двух методов управления пристенной турбулентностью здесь невозможно по той же причине, что была указана выше, — при отсутствии взаимовлияния отклонение от суммы могло бы составить лишь около – 0,5 %, т. е. величину, находящуюся в пределах разброса данных. При больших значениях снижения трения наблюдаемые отклонения от суммы весьма значительны (от +13 до –9 %). Они соответствуют примерно одинаковым эффективностям совместного действия (для  $\psi_{CP} \cong 40 - 50$  %, см. рис.7, *a*), но в два раза различающимся значениям снижения трения при действии толь-

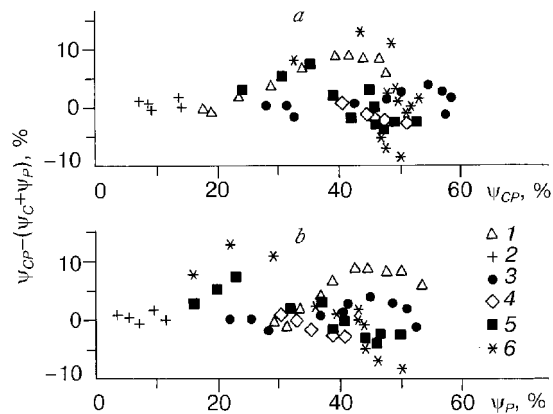


Рис. 7. Отклонение снижения трения при совместном использовании податливого покрытия и полимерных добавок от суммы их индивидуальных эффективностей в зависимости от эффективности совместного действия (*a*) и эффективности снижения трения полимерными добавками на твердой поверхности (*b*).

Для  $U = 9$  м/с: 1 — покрытие № 6 (из компаунда № 1,  $H = 2$  мм),  $T = 16 - 17$  °С,  $\psi_C = -11,5$  %,  $M(\text{ПЭО}) = 3,5$  млн,  $2,1 \cdot 10^{-6} \leq q_\delta \leq 1,2 \cdot 10^{-5}$ ; 2 — покрытие А,  $T = 8,5 - 10,5$  °С,  $\psi_C = +2,6$  %,  $M(\text{ПЭО}) = 4,5$  млн,  $6,0 \cdot 10^{-8} \leq q_\delta \leq 5 \cdot 10^{-7}$ ; 3 — покрытие № 10 (из компаунда № 2,  $H = 7$  мм),  $T = 17$  °С,  $\psi_C = +6$  %,  $M(\text{ПЭО}) = 3,5$  млн,  $1,6 \cdot 10^{-6} \leq q_\delta \leq 1 \cdot 10^{-5}$ ; 4 — покрытие № 10,  $T = 10,5$  °С,  $\psi_C = +12$  %,  $M(\text{ПЭО}) = 3,5$  млн,  $3,5 \cdot 10^{-6} \leq q_\delta \leq 5,5 \cdot 10^{-6}$ . Для  $U = 7$  м/с: 5 — покрытие № 10,  $T = 6,5 - 8,5$  °С,  $\psi_C = +5$  %,  $M(\text{ПЭО}) = 4,7$  млн,  $4 \cdot 10^{-7} \leq q_\delta \leq 3,5 \cdot 10^{-6}$ ; 6 — покрытие № 7 (из компаунда № 2,  $H = 2,5$  мм),  $T = 6,5 - 8,5$  °С,  $\psi_C = 9$  %,  $M(\text{ПЭО}) = 4,7$  млн,  $4 \cdot 10^{-7} \leq q_\delta \leq 3,5 \cdot 10^{-6}$ .



ко полимерных добавок (см. рис.7, *b*). Итак, здесь несомненно существует положительное (т. е. увеличивающее эффективность снижения трения) взаимовлияние двух методов управления турбулентностью, растущее с увеличением расхода полимера до тех значений, при которых достигается максимум приращения эффективности от совместного действия. При дальнейшем увеличении расхода полимера приращение эффективности убывает и затем меняет знак на противоположный, так что с позиций снижения трения взаимовлияние здесь становится уже отрицательным. Уровень наблюдаемых отклонений (от суммы индивидуальных эффективностей) для различных покрытий и скоростей движения различен.

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Эффективность снижения турбулентного трения при совместном использовании вязкоупругих покрытий, газовых микропузырьков и полимерных добавок (для всех четырех сочетаний) равна алгебраической сумме малых индивидуальных эффективностей (по крайней мере, до 16 % суммарного снижения трения).

2. С повышением расходов газа и полимера эффективность снижения трения при совместном действии превышает сумму индивидуальных эффективностей, однако при дальнейшем увеличении расходов эффективность снижения трения может быть и меньше этой суммы, что свидетельствует о существовании взаимовлияния рассмотренных методов управления пристенной турбулентностью.

Работа выполнена при поддержке фонда INTAS (Грант No. 94-3737).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bushnell D.M., Hefner J.N., Ash R.L.** Effect of compliant wall motion on turbulent boundary layer // *Phys. Fluids*. — 1977. — Vol. 20, No. 10, pt. 2. — P. 31 – 48.
2. **Gad-el-Hak M.** Boundary layer interaction with a compliant coating. An overview // *Appl. Mech. Rev.* — 1986. — Vol. 39. — P. 511 – 523.
3. **Merkle C.L., Deutsch S.** Microbubble drag reduction // *Lecture Notes in Engineering 46. Frontiers in Experimental Fluid Mechanics / Eds. G.A. Brebbia, S.A. Orszag.* — Berlin et al.: Springer-Verlag, 1989. — P. 291 – 335.
4. **Virk P.S.** Drag reduction fundamentals // *AIChE J.* — 1975. — Vol. 21, No. 4. — P. 625 – 656.
5. **Semenov B.N.** On conditions of modelling and choice of viscoelastic coatings for drag reduction // *Recent Developments in Turbulence Management / Ed. K.-S. Choi.* — Dordrecht Kluwer, 1991. — P. 241 – 262.
6. **Kulik V.M., Poguda I.S., Semenov B.N.** Experimental investigation of one-layer viscoelastic coating action on turbulent friction and pressure pulsations // *Ibid.* — P. 263 – 289.
7. **Грешилов Е.М., Евтушенко А.М., Лямшев Л.М., Широкова Н.Л.** Некоторые особенности действия полимерных добавок на пристенную турбулентность // *Инж.-физ. журн.* — 1973. — Т. 25. — С. 999 – 1004.
8. **Богдевич В.Г., Малых Н.В., Малога А.Г., Огородников И.А.** Акустические свойства пристенных пузырьковых слоев в воде с большим объемным газосодержанием // *Гидродинамика и акустика пристенных и свободных течений / Под ред. Б.П. Миронова.* — Новосибирск, 1981. — С. 77 – 106.
9. **Кантуэлл Б.Дж.** Организованные движения в турбулентных потоках // *Вихри и волны.* — М.: Мир, 1984. — С. 9 – 79.
10. **Хинце И.О.** Турбулентность. — М.: ГИФМЛ, 1963.
11. **Семенов Б.Н., Кулик В.М., Лопырев В.А. и др.** О совместном влиянии малых полимерных добавок в потоке и податливости поверхности на турбулентное трение // *Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.* — 1984. — № 4, вып. 1. — С. 89 – 93.
12. **Малога А.Г., Микута В.И., Стояновский О.И.** Снижение турбулентного трения при течении аэрированных пузырьками воздуха полимерных растворов // *Пристенные и свободные турбулентные течения / Под ред. Б.П. Миронова, Б.Г. Новикова.* — Новосибирск, 1988. — С. 121 – 130.

13. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: ГИФМЛ, 1974.
14. Кулик В.М., Семенов Б.Н. Об аттестации волновых свойств вязкоупругих покрытий, воздействующих на пристенную турбулентность // Гидродинамические течения и волновые процессы / Под ред. В.Е. Накорякова. — Новосибирск, 1983. — С. 117 – 129.
15. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. — М.: Энергия, 1972.
16. Семенов Б.Н. Безимпульсный ввод полимерных добавок в течение для снижения трения // Сиб. физ.-техн. журн. (Изв. СО РАН). — 1991. — Вып. 4. — С. 90 – 98.

*Статья поступила в редакцию 8 января 1998 г.*