

УДК 532.526.3

© 2002 г. Ю.А. ЛАШКОВ, Н.В. САМОЙЛОВА

## К ВОПРОСУ О СОПРОТИВЛЕНИИ ТРЕНИЯ ПЛАСТИНЫ СО СФЕРИЧЕСКИМИ УГЛУБЛЕНИЯМИ

Прямым весовым методом измерено сопротивление плоских поверхностей со сферическими углублениями. Испытания проводились в малотурбулентной аэродинамической трубе с поперечным сечением  $1000 \times 1000$  и длиной 4000 мм. Исследованы три поверхности с углублениями, имеющими диаметр 7.0, 3.9 и 1.3 мм и глубину соответственно 0.5, 0.3 и 0.2 мм. Показано, что при числах  $Re = (3-9) \cdot 10^6$  и  $M \leq 0.3$  и турбулентном режиме обтекания сферические углубления увеличивают сопротивление плоской поверхности. Не обнаружено заметного влияния сферических углублений на положение ламинарно-турбулентного перехода при  $Re_c \sim 3 \cdot 10^6$ .

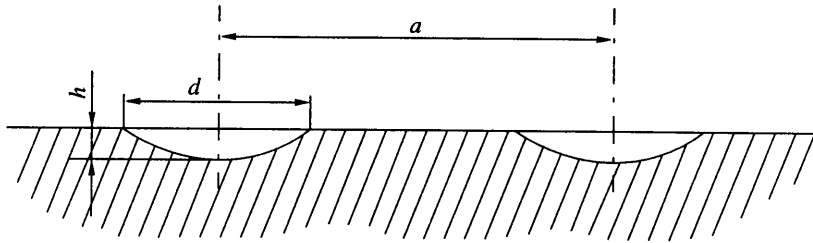
В 1978–1984 гг. в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова был обнаружен эффект образования над трехмерными сферическими углублениями "смерчеобразных" вихревых структур, которые возникали при обтекании газом или жидкостью поверхности с такими углублениями [1–4]. В этих работах предложен новый способ интенсификации теплообмена посредством формирования на гладкой поверхности шахматно-упорядоченной системы сферических углублений. При обтекании таких поверхностей жидкостью или газом наблюдались "самоорганизующиеся динамические структуры", истекающие из углублений в виде вихрей.

Авторы указанных работ отмечают, что существенная интенсификация теплообмена (иногда в несколько раз) происходит "без опережающего роста гидродинамического сопротивления обтекаемой поверхности" в значительном диапазоне чисел Рейнольдса. По мнению авторов, при обтекании поверхности с указанной системой углублений образуется столбообразный вихрь с характерным поперечным размером, близким к радиусу углубления, который выходит в ядро потока теплоносителя и обеспечивает интенсивный теплообмен между пристеночной частью течения и ядром основного потока, "не изменяя при этом степени турбулентности потока, а следовательно, и гидродинамического сопротивления". Последнее утверждение вызывает сомнения в его достоверности, несмотря на то, что при обсуждении полученных результатов сообщалось о некоторых случаях, когда гидравлическое сопротивление поверхности с углублениями типа сферических лунок не превышало или даже было меньше, чем гидравлическое сопротивление гладкой пластины. Снижение сопротивления в указанных случаях, по-видимому, было обусловлено парообразованием, сопровождающим процесс образования вихрей в жидкости над лунками.

Исследование теплообмена и гидродинамики при обтекании поверхностей с упорядоченно расположенными углублениями и выступами представляет собой малоизученную область теплообмена. Экспериментальные исследования, связанные с измерениями гидравлического сопротивления образцов с различными видами шероховатости, образованной в основном упорядоченно расположенными выступами, были выполнены Шлихтингом [5].

В [6–8] исследовались теплообмен и сопротивление при обтекании трехмерных препятствий на исходно гладкой поверхности. По-видимому, наиболее подробные исследования теплообмена и трения на поверхностях, профилированных сфериче-





Фиг. 1. Поверхность с лунками

Здесь  $d$  и  $h$  – диаметр и глубина лунки,  $a$  – расстояние между лунками,  $s$  – скважность (отношение суммарной площади лунок в плане к площади поверхности исследуемой пластины). На всех поверхностях имело место гексагональное расположение лунок. Поверхности № 1 и 2 были изготовлены в ИАЭ им. И.В. Курчатова в лаборатории Г.И. Кикнадзе.

Испытания проводились как при естественно развившемся на пластине пограничном слое, так и при искусственно сформированном с помощью турбулизатора. Турбулизатор выполнен в виде полосы высотой 3 мм и хордой (расстояние по потоку) 20 мм, которая располагалась по всему размаху пластины в сечении сопряжения эллиптического носка с плоской поверхностью на расстоянии 450 мм от передней кромки базовой пластины.

При испытаниях поверхностей № 1 и 2 вначале измерялась касательная сила, действующая на поверхность с лунками, а затем – касательная сила, действующая на гладкую поверхность, которая создавалась путем тщательной шпаклевки углублений при неизменной установке плавающей платформы. В отличие от этой процедуры сопротивление поверхности № 3 и сопротивление соответствующей гладкой пластины измерялись при различных установках платформы весов.

Измеренные значения коэффициента трения  $c_D$  гладкой пластины аппроксимировались зависимостью вида

$$c_D = A[\log(\text{Re}_1 - C)]^m$$

где  $A$ ,  $C$ ,  $m$  – константы. Эта зависимость использовалась при определении относительного коэффициента сопротивления.

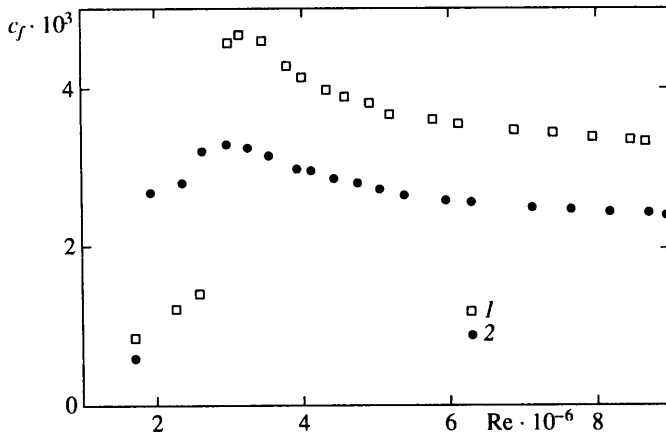
Для выяснения влияния расположения лунок относительно направления потока на сопротивление поверхности № 3 она наклеивалась на вращающийся относительно плавающей платформы диск диаметром 279.5 мм. Поверхность диска с наклеенным образцом устанавливалась заподлицо с невращающейся частью платформы. В этом случае часть поверхности плавающей платформы (на диске) была с углублениями, а периферийная часть платформы – гладкой. Это обстоятельство учитывалось при обработке результатов в предположении отсутствия взаимного влияния гладкой и формованной лунками частей поверхности плавающего элемента.

Отношение площадей гладкой и формованной лунками частей поверхности платформы составляло 0.32. Значение коэффициента сопротивления  $c_f$  поверхности с лунками определялось по формуле

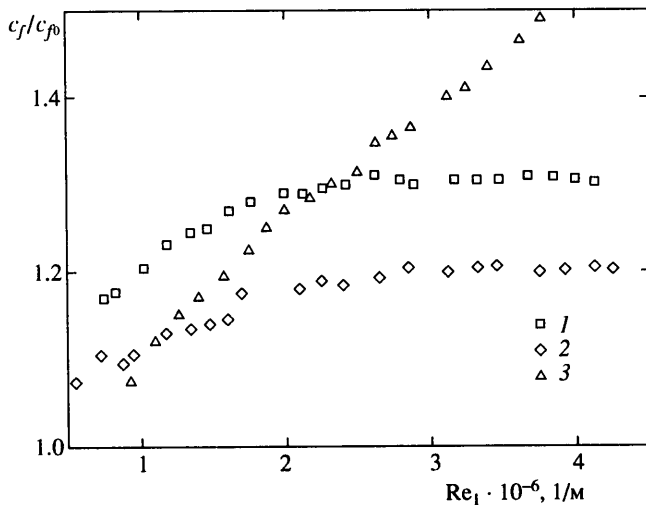
$$c_f = 1.32c_{f2} - 0.32c_D$$

Здесь  $c_{f2}$  – суммарный коэффициент сопротивления платформы,  $c_D$  – коэффициент трения гладкой поверхности, рассчитанный с помощью указанной выше аппроксимации.

В процессе проведения испытаний измерялись касательная сила, скоростной напор, температура и статическое давление потока в рабочей части. По измеренным параметрам вычислялись скорость потока  $U_\infty$ , единичное число Рейнольдса  $\text{Re}_1$  и коэффициент сопротивления по методике, изложенной в [13].



Фиг. 2. Зависимости коэффициента сопротивления трения от числа Рейнольдса (без турбулизатора): 1 – поверхность № 1, 2 – гладкая поверхность



Фиг. 3. Относительный коэффициент сопротивления турбулентного трения в зависимости от единичного числа Рейнольдса для поверхностей с лунками (с турбулизатором); 1 – поверхность № 1, 2 – № 2, 3 – № 3

Помимо указанных испытаний для исследования ламинарно-турбулентного перехода было измерено распределение пульсаций продольной скорости по длине на поверхности № 2 и на гладкой пластине при нескольких значениях скорости  $U_\infty$ . Это осуществлялось с помощью специального координатника, который перемещался вдоль оси  $x$ . В координатнике на расстоянии  $\sim 0.4$  мм от поверхности пластины закреплялся односторонний термоанемометрический датчик, показания которого фиксировались аппаратурой фирмы DISA.

Исследования ламинарно-турбулентного перехода на поверхности № 3 проводились в аэродинамической трубе Т-36И с незамкнутым контуром. Длина рабочей части трубы 2.7 м, прямоугольная рабочая часть  $350 \times 500$  мм, скорость потока до 65 м/с. Среднеквадратичные пульсации скорости в свободной рабочей части не превышают 0.06%.

Пленка с лунками наклеивалась на нижнюю стенку аэродинамической трубы. Аналогично измерениям в аэродинамической трубе Т-124 профили пульсаций продольной скорости измерялись на высоте  $\sim 0.5$  мм от исследуемой поверхности при постоянной скорости потока в рабочей части. Измерения проводились при скоростях потока от 18 до 32 м/с. По положению максимума пульсаций скорости определялось число Рейнольдса ламинарно-турбулентного перехода  $Re_p$ .

2. На фиг. 2 приведены зависимости измеренного прямым весовым методом коэффициента сопротивления  $c_f$  от числа  $Re$  для гладкой поверхности и поверхности № 2 с лунками диаметром 3.9 мм без использования искусственной турбулизации потока. Из приведенных данных следует, что в этом случае при  $Re < 3 \cdot 10^6$  имеет место переходный режим течения в пограничном слое в зоне расположения плавающего элемента. Аналогичный характер поведения зависимости  $c_f(Re)$  наблюдался и для поверхности № 1. В дальнейшем при проведении весовых измерений всегда использовался турбулизатор, геометрические параметры которого указаны выше. Следует отметить, что и без искусственной турбулизации при турбулентном режиме течения в пограничном слое ( $Re > 3 \cdot 10^6$ ) сопротивление гладкой пластины всегда было меньше сопротивления пластины со сферическими углублениями.

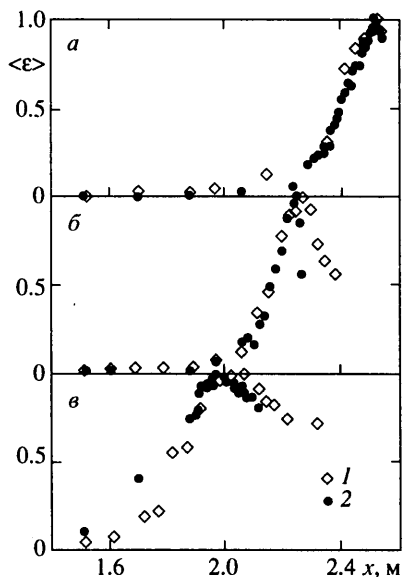
На фиг. 3 приведены результаты измерений относительного коэффициента сопротивления  $c_f/c_{f0}$  поверхностей со сферическими углублениями в зависимости от единичного числа  $Re_1$  при использовании турбулизатора. Из приведенных данных видно, что во всем исследованном диапазоне турбулентных режимов течения сопротивление пластин со сферическими углублениями превышает сопротивление трения гладкой пластины. При этом относительный коэффициент сопротивления поверхностей № 1 и 2 при  $Re_1 > 3 \cdot 10^6$  стабилизируется и выходит "на полку" (превышение по сравнению с сопротивлением гладкой пластины составляет соответственно 30 и 20%). Сопротивление поверхности № 3 монотонно возрастает по сравнению с сопротивлением трения гладкой поверхности во всем исследованном диапазоне режимов течения.

При исследовании влияния расположения углублений относительно направления потока (поверхность № 3) на сопротивление было установлено, что направление течения весьма слабо влияет на сопротивление указанной поверхности: изменение составляло не более чем 3% при варьировании направления потока в пределах угла  $\pm 20^\circ$ .

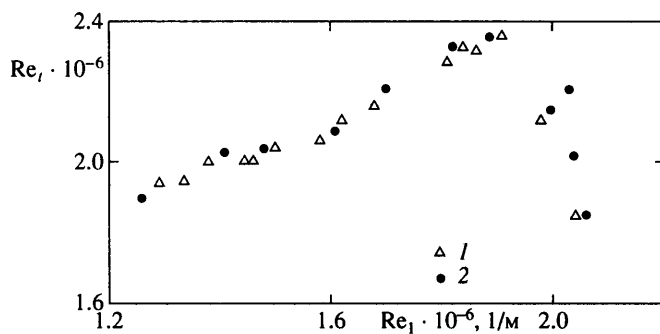
Следует отметить, что при наклейке поверхности № 3 обратной стороной (вверх выступами) сопротивление оказалось примерно на 10% ниже, чем для поверхности с лунками.

На фиг. 4 для трех значений скорости потока в рабочей части аэродинамической трубы Т-124 приведены зависимости относительных пульсаций продольной скорости от координаты  $x$ , измеряемой от носка базовой пластины, для гладкой поверхности и поверхности № 2. Относительная величина среднеквадратичных пульсаций продольной скорости ( $\epsilon$ ) определялась как отношение величины пульсаций скорости в данной точке к максимальной величине пульсаций в области ламинарно-турбулентного перехода. Из приведенных данных видно, что с ростом скорости потока в рабочей части область перехода перемещается вверх по потоку, и при  $U_\infty = 23$  м/с максимум пульсаций располагается практически посередине плавающего элемента, находящегося на расстоянии 2 м от носка пластины. Отметим, что присутствие сферических углублений по крайней мере не приводит к более раннему переходу.

Аналогичная картина наблюдается и на фиг. 5, где на основании испытаний в аэродинамической трубе Т-36И приведены результаты измерений влияния единичного числа Рейнольдса  $Re_1 = U_\infty/\nu$  на число  $Re_p$  ламинарно-турбулентного перехода для гладкой поверхности и поверхности № 3. Видно, что и в рассматриваемом случае лунки не оказывают существенного влияния на положение ламинарно-турбулентного перехода, что согласуется с результатами испытаний двух других поверхностей с лунками в аэродинамической трубе Т-124.



Фиг. 4. Распределение относительных пульсаций скорости на высоте 0.4 мм от поверхности вдоль продольной координаты  $x$  при  $U_\infty = 13.3$  (а), 18.2 (б) и 23 м/с (в); 1 – поверхность № 2, 2 – гладкая поверхность



Фиг. 5. Число Рейнольдса ламинарно-турбулентного перехода в зависимости от единичного числа Рейнольдса; 1 – поверхность № 3, 2 – гладкая поверхность

**Заключение.** При числах Рейнольдса  $Re = (3-9) \cdot 10^6$ , числах Маха  $M \leq 0.3$  и турбулентном режиме обтекания сферические углубления увеличивают сопротивление плоской поверхности. Этот результат согласуется с данными [1-4] об интенсификации теплообмена за счет увеличения массообмена у стенки, вызванного сферическими углублениями, что приводит, в свою очередь, к увеличению сопротивления. Можно предположить, что наблюдавшееся в некоторых других исследованиях снижение сопротивления вызвано появлением режима двухфазности течения (парообразованием). Влияние сферических углублений на положение ламинарно-турбулентного перехода при числе  $Re$ , перехода  $\sim 3 \cdot 10^6$  незначительно.

Исследования влияния сферических углублений на ламинарно-турбулентный переход в аэродинамической трубе Т-36И проведены с участием В.Г. Шумилкина. Авторы выражают благодарность В.В. Михайлову за постоянное внимание к работе, а также Г.В. Енютину и Е.А. Шумилкиной за помощь в проведении испытаний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калиненко О.А., Кикнадзе Г.И., Коляскин О.Е. и др.* Метод интенсификации теплообмена. Препринт № 3998/4. М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1984. 8 с.
2. *Гачечиладзе И.А., Кикнадзе Г.И., Краснов Ю.К. и др.* Теплообмен при самоорганизации смерчеобразных структур // Теплообмен. Минский междунар. форум: Проблемные доклады. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова АН БССР–ММФ, 1988. Секц. 1.2. С. 83–125.
3. *Кикнадзе Г.И., Краснов Ю.К., Подымака М.Ф., Хабенский В.Б.* Самоорганизация вихревых структур при обтекании водой полусферической лунки // Докл. АН СССР. 1986. Т. 291. № 6. С. 1315–1318.
4. *Алексеев В.В., Гачечиладзе И.А., Кикнадзе Г.И., Олейников В.Г.* Смерчевой энергообмен на трехмерных вогнутых рельефах-структурах самоорганизующихся течений, их визуализация и механизмы обтекания поверхностей. 2-я Рос. нац. конференция по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ, 1998. Т. 6. С. 33.
5. *Schlichting H.* Experimentelle Untersuchungen zum Rauigkeitsproblem // Ing.-Arch. 1936. Bd 7. H. 1. S. 1–34.
6. *Ененко В.И., Шишков В.М., Анисин А.К.* Теплообмен и сопротивление профильной пластинчатой поверхности с коридорным расположением сфероидальных выштамповок // Трансп. машиностроение. 1970. № 5–74–10. С. 5–10.
7. *Каздоба А.К., Шишков В.М.* Выбор пластинчатых поверхностей теплообмена для локомотивных теплообменных аппаратов // Трансп. машиностроение, 1974. № 5–74–10. С. 11–15.
8. *Анисин А.К.* Теплопередача и сопротивление трубчатой поверхности с двухсторонними сфероидальными элементами шероховатости // Изв. вузов. Энергетика. 1983. № 3. С. 93–96.
9. *Афанасьев В.Н., Леонтьев А.И., Чудновский Я.П.* Теплообмен и трение на поверхностях, профилированных сферическими углублениями. Препринт № 1-90. М.: МГТУ, 1990. 118 с.
10. *Афанасьев В.Н., Веселкин В.Ю., Леонтьев А.И. и др.* Гидродинамика и теплообмен при обтекании одиночных углублений на исходно гладкой поверхности. Препринт № 2-91. М.: МГТУ, 1991. 55 с.
11. *Bearman P.W., Harvey J.K.* Golf ball aerodynamics // Aeronaut. Quaterly. 1976. V. 27. № 2. P. 112–122.
12. *Mehta R.D.* Aerodynamics of sports balls // Annu. Rev. Fluid Mech. 1985. V. 17. P. 151–189.
13. *Енютин Г.В., Лашков Ю.А., Самойлова Н.В., Фадеев И.В., Шумилкина Е.А.* Экспериментальное исследование влияния продольного оребрения на сопротивление трения плоской пластины // Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. № 2. С. 140–145.

Москва

Поступила в редакцию  
27.III.2001