

**О РАЗВИТИИ ПОПЕРЕЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ
В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ
ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ОБТЕКАНИИ ПРЯМОГО ДВУГРАННОГО УГЛА**

В. И. Корнилов, А. М. Харитонов

(Новосибирск)

При обтекании угловых конфигураций реализуются случаи взаимодействия как ламинарных, так и турбулентных пограничных слоев. Ранее выполненные исследования [1, 2] свидетельствуют о том, что при взаимодействии турбулентных пограничных слоев в окрестности биссекторной плоскости угла развиваются поперечные течения в виде пары вихрей, вращающихся в противоположных направлениях.

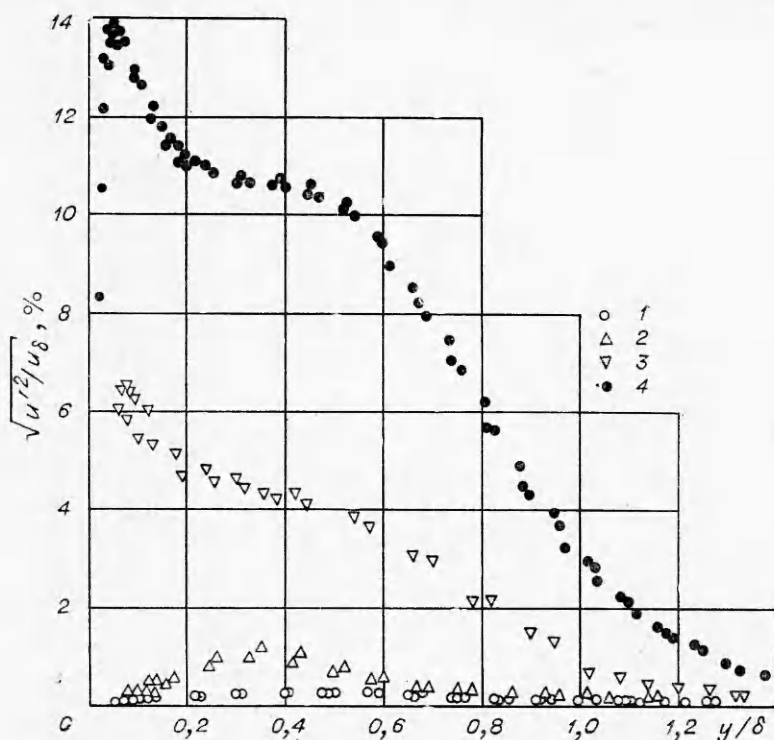
Данная работа посвящена экспериментальному исследованию условий возникновения и развития поперечных течений в области взаимодействия пограничных слоев по мере перехода от ламинарного состояния к турбулентному.

Опыты выполнены в малотурбулентной аэродинамической трубе ИТПМ СО АН СССР Т-324 [3] в условиях безградиентного обтекания модели прямого двугранного угла. Описание конструкции модели и методики основных измерений изложены в [2]. Эксперименты проводились при средней скорости потока в рабочей части $u_\infty = 7,6$ м/с и числе Рейнольдса $Re_1 \approx 0,53 \cdot 10^6$, m^{-1} , начальной степени турбулентности $\varepsilon \approx 0,03\%$ и нулевом радиусе сопряжения граней угла. В качестве регистрирующей аппаратуры при измерении продольной составляющей скорости и ее пульсаций использовался термоанемометр постоянной температуры 55D00 фирмы DISA в комплекте с линейризатором 55D10. В большинстве опытов применялся датчик с нитью Волластона длиной 0,65 мм и диаметром 3 мкм, что обеспечило достаточно низкую постоянную времени τ . При этом рабочая полоса частот превышала 40 кГц. Все это позволило получить в исследованных условиях приемлемую разрешающую способность термоанемометрической системы в целом. Исследование спектральных характеристик пульсаций скорости производилось анализатором частот типа 2010 фирмы Brüel & Kjer. При измерениях пульсаций скорости термоанемометром использован опыт, накопленный в ИТПМ и других организациях [4—9].

Результаты исследований перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный при обтекании прямого двугранного угла при сверхзвуковых скоростях [10] показали, что в биссекторной плоскости пограничный слой становится турбулентным непосредственно от передней кромки, хотя вне области взаимодействия на гранях угла реализуются и взаимодействуют на некотором участке ламинарные пограничные слои.

С целью более детального изучения этого обстоятельства проведены измерения распределения среднеквадратичных пульсаций скорости в пограничных слоях нескольких сечений по мере удаления от передней кромки модели. Такие измерения выполнены как вне области взаимодействия, так и в биссекторной плоскости угла ($y_1 = z_1$).

На фиг. 1 в виде зависимости $\sqrt{u'^2}/u_\delta = f(y/\delta)$ представлены профили среднеквадратичных пульсаций продольной составляющей скорости, измеренные в пограничном слое угла на расстоянии $z_1 = 62$ мм от линии пересечения плоскостей, т. е. вне области взаимодействия. Здесь u_δ — скорость на внешней границе пограничного слоя, y — координата, направ-

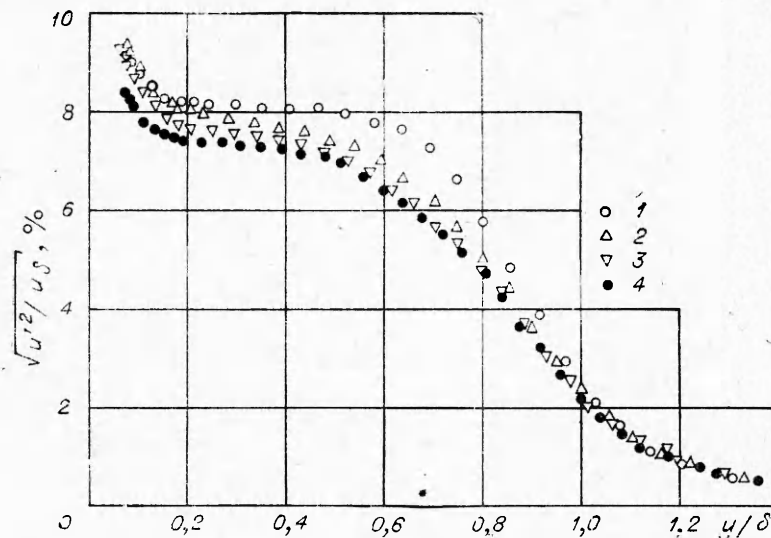


Ф и г. 1

ленная поперек пограничного слоя параллельно биссекторной плоскости угла, δ — толщина пограничного слоя, определенная при условии, что $u = 0,99 u_\delta$. Точки 1—4 обозначают расстояние x от передней кромки модели, равное соответственно 389; 500; 700 и 890 мм.

Видно, что в сечении $x = 389$ мм пограничный слой находится в ламинарном состоянии. Действительно, в этом случае уровень среднеквадратичных пульсаций очень низок и в основном обусловлен шумами электронной аппаратуры и спецификой ее настройки. Кроме того, и профиль средней скорости удовлетворительно согласуется с хорошо известным теоретическим профилем Блазиуса. По мере удаления от передней кромки величина пульсаций возрастает и достигает максимального значения, которое вблизи стенки составляет около 14%. Оценки показывают, что в этом случае распределение пульсаций по высоте пограничного слоя незначительно отличается от аналогичной зависимости, которая справедлива в области развитого турбулентного течения на плоской пластине. Это свидетельствует о том, что в исследованных условиях при $Re_x \approx 0,47 \cdot 10^6$ пограничный слой находится в состоянии, близком к равновесному.

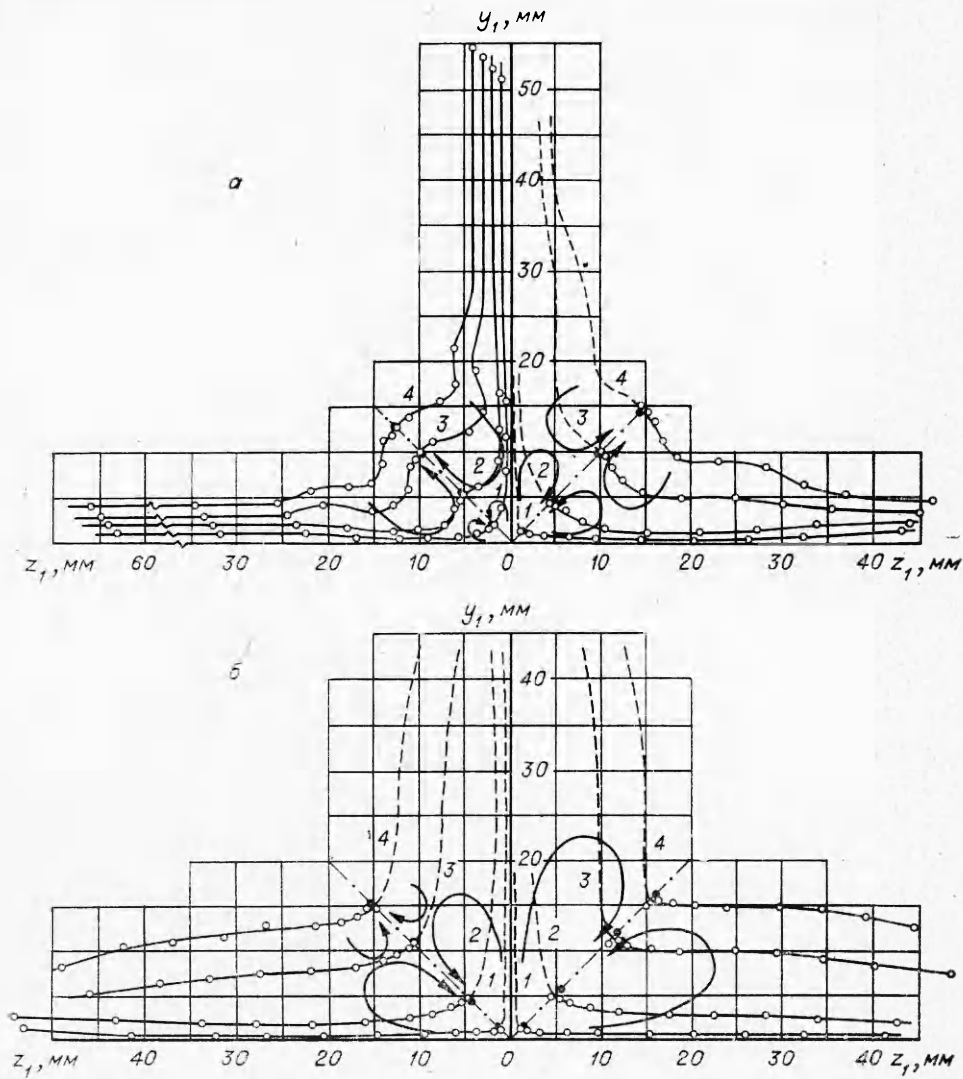
Характерно, что независимо от того, в каком состоянии находятся взаимодействующие пограничные слои, в самой биссекторной плоскости угла пограничный слой уже при $Re_x \approx 2 \cdot 10^5$ является турбулентным. Об этом свидетельствует фиг. 2, на которой представлены профили среднеквадратичных пульсаций продольной составляющей скорости при $y_1 = z_1$ (обозначения те же, что и на фиг. 1). Видно, что уже в первом сечении ($x = 389$ мм) уровень пульсаций достаточно высок и составляет в пристенной области течения около 9%. По длине модели величина $\sqrt{u'^2}/u_\delta$ изменяется незначительно, что указывает на турбулентное состояние погра-



Ф и г. 2

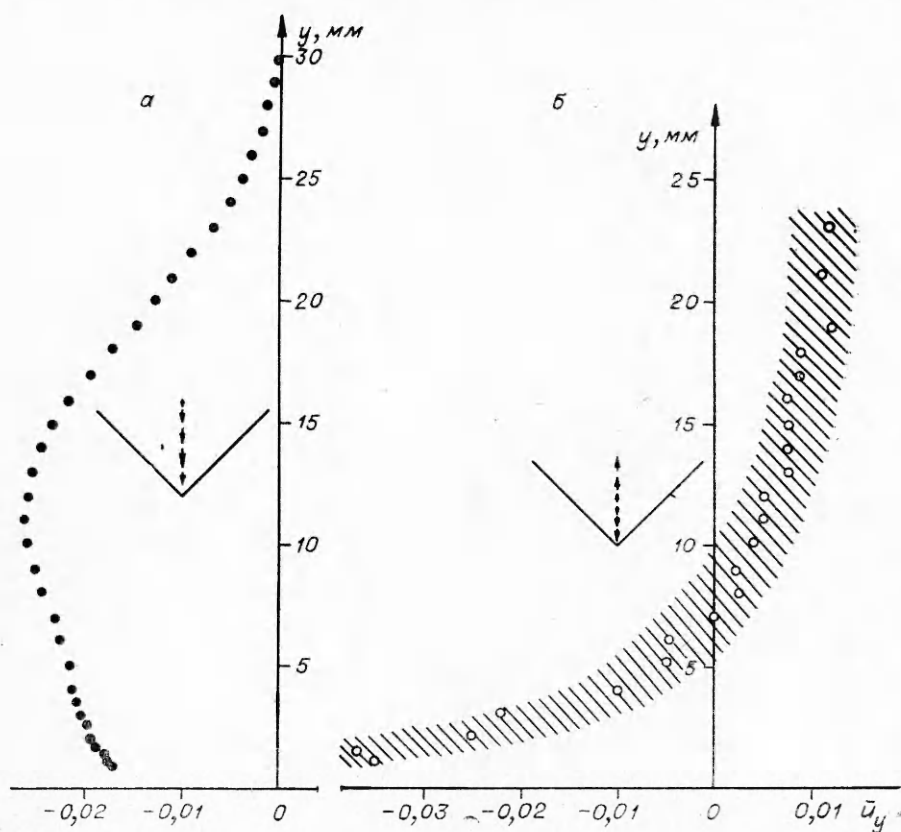
ничного слоя. Это подтверждается также характером распределения функции спектральной «плотности мощности», полученной как в сечении $x = 389$ мм, так и при больших значениях координаты x . Однако по мере приближения к передней кромке угла уровень пульсаций заметно снижается, на спектрограммах наблюдаются отдельные дискретные частоты. Для выяснения причин этого явления были выполнены дополнительные измерения с целью определения положения области перехода из ламинарного состояния в турбулентное. Они показали, что в биссекторной плоскости угла турбулентный пограничный слой при $Re_1 = 0,53 \cdot 10^6$, m^{-1} устанавливается не от самой передней кромки, а существует некоторая переходная зона (до $Re_x \approx 1,7 \cdot 10^5$), которая обусловлена, по-видимому, как точкой пересечения передних кромок граней, выполняющей роль турбулизатора, так и характером взаимодействия пограничных слоев на начальном участке модели. Таким образом, колебания дискретного тона, наблюдаемые на спектрограммах, очевидно, аналогичны тем, которые имеют место в предпереходной и переходной областях плоского пограничного слоя [4]. Это требует специального изучения. Приведенные же здесь результаты убедительно показывают, что при взаимодействии ламинарных пограничных слоев, развивающихся на гранях угла, в окрестности биссекторной плоскости реализуется турбулентный пограничный слой так же, как и при взаимодействии турбулентных пограничных слоев ниже по течению. При этом в области взаимодействия, которая расширяется по мере удаления от передней кромки, отчетливо наблюдаются поперечные течения в виде парных вихрей с противоположным направлением вращения.

Типичное распределение изотак (линий равных скоростей) в сечениях, где взаимодействуют ламинарные и близкие к ламинарным пограничные слои, приведено на фиг. 3, а (слева сечение $x = 389$ мм, справа сечение $x = 500$ мм). Здесь изотак 1—4 соответствуют отношению скоростей $u/u_\delta = 0,5; 0,7; 0,9$ и $0,99$. В окрестности биссекторной плоскости контур изотак в этих сечениях имеет выпуклый характер, а вращение вихрей направлено к угловой линии и от нее к внешнему потоку. Напротив, в сечениях, где взаимодействуют переходные и турбулентные пограничные слои (фиг. 3, б, слева сечение $x = 700$ мм, справа сечение $x = 890$ мм), контур



Ф и г. 3

изотах имеет вогнутый характер, а вращение вихрей в сечении направлено вдоль биссекторной плоскости к угловой линии и от нее по размаху угла. Светлыми кружками обозначены данные, полученные пневмонасадком, темными — термоанемометром. Во всех случаях вне области взаимодействия пограничных слоев изотакхи расположены параллельно граням угла, а профиль скоростей, как было показано ранее [2], такой же, как при обтекании плоской пластины. Можно полагать, что в формировании контура изотакхи определенную роль играет процесс затормаживания газа вблизи угловой линии. Тем не менее окончательная картина распределения изотакхи при взаимодействии ламинарных и турбулентных пограничных слоев получается существенно различной. Следовательно, искажение контура изотакхи в основном определяется возникающими поперечными течениями. При этом остается неясным, каким образом происходит обращение вращения вихрей, развивающихся в окрестности биссекторной



Фиг. 4

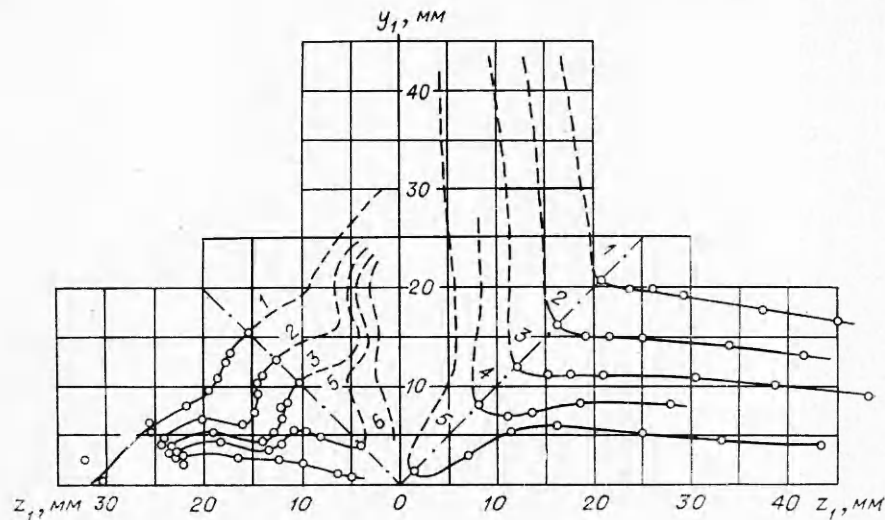
плоскости, по мере перехода взаимодействующих ламинарных пограничных слоев в турбулентные.

С целью выяснения этого обстоятельства были выполнены измерения профилей поперечной составляющей скорости в биссекторной плоскости угла при взаимодействии как ламинарных, так и турбулентных пограничных слоев. На фиг. 4, *a* показан профиль компоненты $\bar{u}_y = u_y/u_\delta$, полученный при взаимодействии развитых турбулентных течений. Видно, что практически по всей высоте слоя величина \bar{u}_y отрицательна. Это означает что поперечные течения в биссекторной плоскости направлены от внешней границы пограничного слоя к угловой линии. С другой стороны, профиль поперечной составляющей, полученный при взаимодействии ламинарных пограничных слоев (фиг. 4, *b*), дает основание считать, что в биссекторной плоскости угла имеют место поперечные течения, направленные к угловой линии и к внешней границе пограничного слоя. Действительно, поперечная компонента \bar{u}_y в этом случае имеет как положительные, так и отрицательные значения. Следует отметить, что в силу очень малых значений поперечной составляющей скорости (менее 3% от величины u_δ) этот профиль получен с большой погрешностью и может рассматриваться лишь для качественных оценок. Вероятная полоса разброса данных, показанная на фиг. 4, *b*, дает основание полагать, что при взаимодействии ламинарных пограничных слоев ($x = 389$ мм) наряду с преобладающим движением от угловой линии в верхней половине слоя имеет место движение к угловой линии вблизи стенки.

Исходя из вышеизложенного, можно представить схему развития поперечных течений в области взаимодействия пограничных слоев по длине модели. Их направление условно показано стрелками на фоне линий равных скоростей (см. фиг. 3, *a*, *b*). Представляется очевидным, что при взаимодействии ламинарных пограничных слоев (см. фиг. 3, *a* слева) по каждую сторону от биссекторной плоскости угла реализуется не один, а два или, возможно, даже большее количество вихрей. Действительно, учитывая симметричный характер течения относительно биссекторной плоскости угла, последнюю можно условно заменить некой твердой границей. Тогда понятно, что поперечный поток, направленный примерно по нормали к этой границе, присоединяется к ней и, растекаясь к внешней границе пограничного слоя и к угловой линии, образует два противоположно вращающихся вихря. При взаимодействии ламинарных пограничных слоев верхний вихрь, очевидно, является преобладающим, отсюда и соответствующая деформация изотак в сторону внешнего потока. По мере удаления от передней кромки модели нижний вихрь постепенно увеличивается, вытесняя верхний, который в конце концов исчезает, по-видимому, вследствие эффектов вязкой диссипации в пограничном слое и уменьшающего влияния ламинарного подслоя. Очевидно, при $x = 890$ мм (см. фиг. 3, *b* справа) реализуется только один вихрь, имеющий направление вращения к угловой линии, что подтверждается профилем поперечной составляющей скорости на фиг. 4, *a*. Таким образом, при взаимодействии турбулентных пограничных слоев направление вращения вихря противоположно тому, которое наблюдалось при взаимодействии ламинарных пограничных слоев.

Отмеченная особенность подтверждается и линиями равных пульсаций продольной составляющей скорости $\sqrt{u'^2}/u_\delta = \text{const}$, которые при $x = 391$ и 897 мм приведены соответственно на фиг. 5 слева и справа. Здесь кривая *1* соответствует величине пульсаций $\sqrt{u'^2}/u_\delta = 0,01$, *2* — $0,03$, *3* — $0,06$, *4* — $0,074$, *5* — $0,08$, *6* — $0,10$. Видно, что в зависимости от расстояния от передней кромки линии равных пульсаций скорости, как и изотак, деформированы или к внешней границе пограничного слоя ($x = 391$ мм), или к угловой линии ($x = 897$ мм), отражая тем самым специфику поперечных течений. Кроме того, профили пульсаций поперек пограничного слоя при $x = 897$ мм показывают, что их уровень в биссекторной плоскости угла существенно ниже, чем вне области взаимодействия. Это вызвано тем, что поперечными течениями газ с низкой степенью турбулентности переносится из внешнего потока в направлении угловой линии. Последнее, естественно, приводит к снижению величины пульсаций в плоскости симметрии угла и подтверждает вывод о том, что при взаимодействии турбулентных пограничных слоев поперечные течения направлены вдоль биссекторной плоскости к угловой линии.

Таким образом, экспериментально показано, что при обтекании прямого двугранного угла с нулевым радиусом сопряжения граней в области взаимодействия ламинарных пограничных слоев развиваются вторичные течения в виде вихрей со взаимно противоположным направлением вращения. Наряду с этим преобладающим поперечным течением в окрестности угловой линии зарождается еще одна пара вихрей с противоположным направлением вращения. По мере перехода взаимодействующих ламинарных пограничных слоев в турбулентные происходит плавное обращение направления вращения преобладающей пары вихрей, так что в зоне взаимодействия турбулентных пограничных слоев поперечные течения направлены к угловой линии и от нее по размаху граней.



Ф и г. 5

Авторы выражают благодарность Н. Ф. Полякову за оказанную им помощь при измерении частотных спектров пульсирующей скорости.

Поступила 13 II 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Mojola O. O., Young A. d. An experimental investigation of the turbulent boundary layer along a corner. AGARD-CP-93, 1971.
2. Корнилов В. И., Харитонов А. М. Взаимодействие турбулентных пограничных слоев в прямом двугранном угле. — ПМТФ, 1978, № 3.
3. Багаев Г. И., Голов В. К., Медведев Г. В., Поляков Н. Ф. Аэродинамическая труба малых скоростей Т-324 с пониженной степенью турбулентности. — В кн.: Аэрофизические исследования. Новосибирск, изд. ИТПМ СО АН СССР, 1972.
4. Поляков Н. Ф. Методика исследований характеристик потока в малотурбулентной аэродинамической трубе и явления переход в несжимаемом пограничном слое. — Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Новосибирск, ИТПМ СО АН СССР, 1973.
5. Косорыгин В. С., Поляков Н. Ф., Румянцева Л. А., Эник Э. Я. Некоторые вопросы методики исследования структуры турбулентного пограничного слоя с помощью термоанемометра. — В кн.: Физическая газодинамика, Новосибирск, изд. ИТПМ СО АН СССР, 1976.
6. Nguyen van Thinh. On some measurement made by means of a hot wire in a turbulent flow near a wall. — «DISA Information», 1969, N 7.
7. Oka S., Kostik Z. Influence of wall proximity on hot wire velocity measurement. — «DISA Information», 1972, N 14.
8. Земская А. С., Левицкий В. П., Реник Е. У., Соседко Ю. И. Влияние близости стенки на показания термоанемометра в ламинарном и турбулентном пограничном слое. — «Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук», 1977, вып. 3, № 13.
9. Филиппов В. М. Исследование влияния конечной длины нити термоанемометра на ее рабочие характеристики. — «Труды ЦАГИ», 1970, вып. 1275.
10. Корнилов В. И., Харитонов А. М. Экспериментальное исследование сжимаемого пограничного слоя вблизи линии пересечения двух пластин, образующих прямой угол. — «Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук», 1974, вып. 2, № 8.