

УДК 532.526+534.29

## **ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С НЕБЛАГОПРИЯТНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ**

**ДОВГАЛЬ А. В., КОЗЛОВ В. В.**

Экспериментально исследовано течение в ламинарном пограничном слое в области неблагоприятного градиента давления при наличии акустического поля. Показано, что под влиянием звука происходит существенная перестройка ламинарного течения. Сильное влияние звука на среднее течение есть результат возбуждения вихревых возмущений; этим, однако, не объясняется полностью отмеченное явление.

Структура течения в области возрастания статического давления в направлении потока во многом определяет обтекание тела в целом. Подробный обзор существующих способов воздействия на течение в этой области и отрыв пограничного слоя приведен в [1], а влияние звука рассмотрено в [2]. При этом отмечается, что сильное влияние на местоположение отрыва наблюдается при турбулизации течения в пограничном слое тем или иным способом выше по потоку от положения отрыва, т. е. при подмене ламинарного отрыва турбулентным. Именно с этих позиций и объяснялось устранение отрыва при стимулировании процесса перехода к турбулентности в пограничном слое с помощью звука [3].

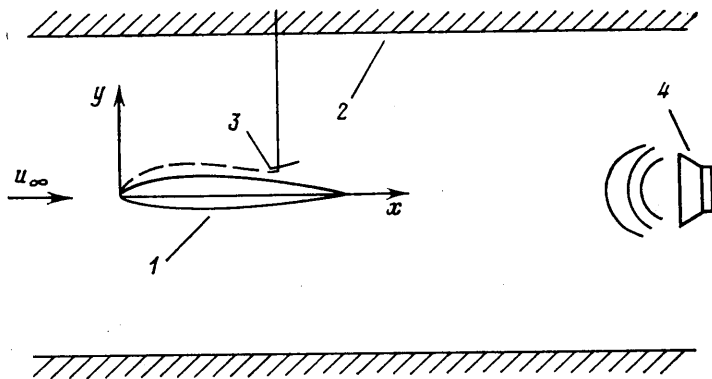
В работе [4] было установлено, что перестройка структуры ламинарного течения в области отрыва пограничного слоя происходит под влиянием двумерных вихревых возмущений первоначально малой амплитуды (волны Толлмина — Шлихтинга), усиливающихся на участке положительного градиента давления. Согласно результатам исследований [5, 6], колебания пограничного слоя возбуждаются при преобразовании акустических возмущений потока в волны Толлмина — Шлихтинга на пространственных неоднородностях течения. Поэтому закономерным становится вопрос о том, происходит ли преобразование акустических возмущений в волны пограничного слоя с неблагоприятным градиентом давления и каково в этом случае влияние звука на структуру среднего течения.

**1. Методика измерений.** Эксперимент выполнен в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТГИМ СО АН СССР (фиг. 1). Течение в пограничном слое с продольным градиентом давления моделировалось на прямом крыле 1 [4, 7] с хордой  $L=700$  мм, которое располагалось вертикально в рабочей части 2 под нулевым углом атаки. Измерение средних и пульсационных величин скорости потока осуществлялось с помощью термоанемометра постоянной температуры, датчик которого 3 вводился в поток через окно в стене рабочей части. Подробное описание методики измерений и обработки сигнала датчика можно найти в [7]. В диффузоре трубы располагался динамический громкоговоритель 4 для возбуждения акустических колебаний в потоке. Исследование проводилось при скорости набегающего потока  $u_\infty=5,7$  м/с. При этом реализовался отрыв ламинарного пограничного слоя с последующим турбулентным присоединением, как и в работе [4].

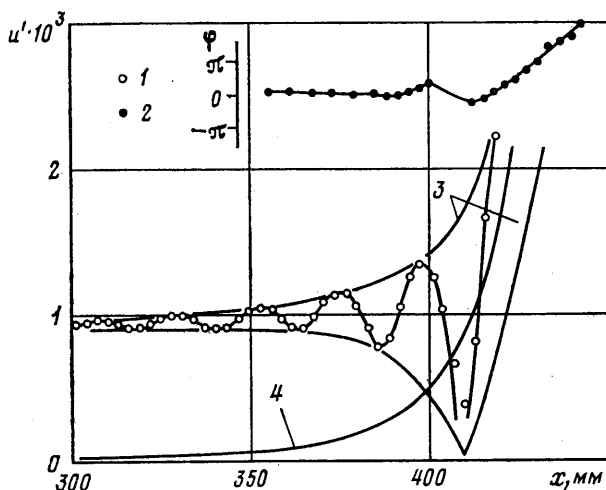
Первоначально было измерено распределение статического давления над моделью с помощью дренажных отверстий, расположенных в ряд по продольной координате  $x$  на поверхности крыла. Оно совпадает с распределением, полученным в [4], что позволило в дальнейшем провести количественное сопоставление результатов по развитию возмущений, возбуждаемых в пограничном слое звуком и вибрирующей лентой. Влияние акустического поля на течение в пограничном слое исследовалось в диапазоне частот  $f=30-250$  Гц в полосе 4 Гц при уровне звукового давления в рабочей части 90–105 дБ, превышающем интегральный по спектру фоновый шум установки на 20–30 дБ. Частота звука задавалась на генераторе звуковых сигналов ГЗ-34. Интенсивность звука контролировалась с помощью «точного импульсного шумомера» PSI 202 и подбиралась такой, чтобы акустический спектр был монохроматическим.

**2. Генерация колебаний.** При возбуждении в рабочей части трубы акустического поля в пограничном слое были обнаружены двумерные вихревые колебания с частотой, равной частоте звука, которые станови-

лись заметными в области неблагоприятного градиента давления (т. е. при  $x > 290$  м) и возрастали в направлении потока. Возникновение волн в пограничном слое фиксировалось при измерении распределений амплитуды и фазы сигнала с датчика термоанемометра вдоль пограничного слоя в точках максимума амплитуды возмущения по поперечной координате  $y$ . Такой способ разделения акустической и вихревой компонент возмущения, описанный в [5, 6, 8], иллюстрируется на фиг. 2 для коле-



Фиг. 1



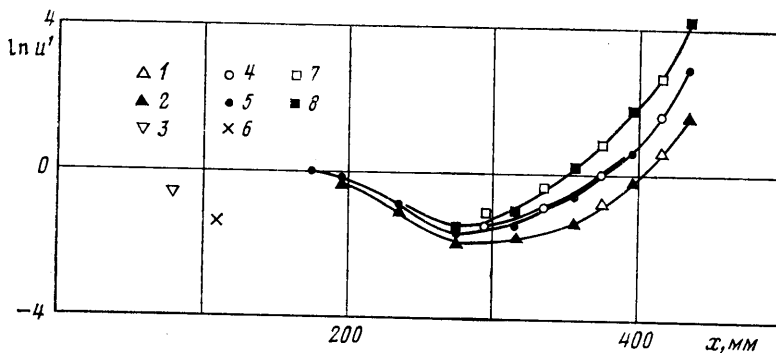
Фиг. 2

баний с частотой  $f=116$  Гц. Точки, обозначенные цифрой 1, соответствуют амплитуде возмущения, отнесенной к скорости набегающего потока, а цифрой 2 — фазе  $\varphi$  пульсационной составляющей. Вследствие суперпозиции звуковой волны и вихревого возмущения той же частоты сигнал с датчика представляет собой пространственные биения по продольной координате. Период биений практически равен длине вихревой волны, поскольку в исследованном диапазоне частот она во много раз меньше длины волны акустических колебаний. Длину волны возмущения можно также определить и по изменению фазы. В настоящей работе интенсивность  $u'$  волны Толлмина — Шлихтинга определялась из амплитуды суммарного сигнала: кривые 3 и 4 — соответственно огибающая и кривая нарастания выделенной вихревой волны (см. [8]).

Определенная указанным образом длина волны  $\lambda$  вихревого возмущения, возбуждаемого в пограничном слое звуком, для частоты 156 Гц,

в частности, была равна  $\lambda=19\pm 0,5$  мм и совпадала с длиной волны вихревого возмущения, создаваемого вибрирующей лентой [7].

На фиг. 3 приведено сравнение нарастания возмущений, возбуждаемых звуком (точки 1 —  $f=176$  Гц, 4 —  $f=156$  Гц, 7 —  $f=116$  Гц) и вибрирующей лентой (точки 2, 5, 8 — из результатов работы [4] для тех же частот возмущений). Интенсивность возмущений отнесена к амплитуде в точке  $x=175$  мм. Волна при акустическом возбуждении становится заметной в начале области неблагоприятного градиента давления. Ниже по потоку ее нарастание практически совпадает с нарастанием возмущения, вводимого в пограничный слой вибрирующей лентой. Это говорит о том, что воздействие звука на развитие волны на этом участке (возможна, например, распределенная генерация возмущений) незначительно. Вслед-



Фиг. 3

ствие больших коэффициентов усиления амплитуда возмущений, которые, возможно, и порождаются ниже по потоку, много меньше амплитуды колебаний, генерируемых в начале области неблагоприятного градиента давления.

Таким образом, под влиянием звука в пограничном слое с неблагоприятным градиентом давления происходит выделение вихревых колебаний, являющихся собственными колебаниями пограничного слоя, на дальнейшее поведение которых в этой области звук практически не оказывает заметного влияния.

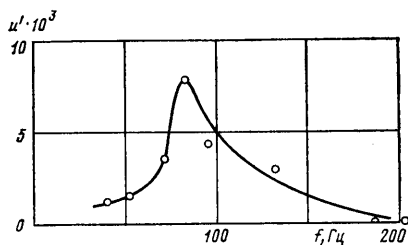
На фиг. 4 изображен частотный диапазон, в котором наблюдалось возбуждение пограничного слоя звуком. Амплитуды вихревых колебаний измерялись в сечении  $x=440$  мм для одной и той же интенсивности звука, равной 95 дБ. Генерация колебаний пограничного слоя зарегистрирована в диапазоне  $40 \text{ Гц} < f < 200 \text{ Гц}$ . Вне этого диапазона частот возмущения не возбуждались. Как видно из графика, амплитуда вихревых волн имеет наибольшее значение вблизи частоты, равной 85 Гц, и уменьшается при приближении к границам диапазона.

Для того чтобы локализовать область генерации возмущений акустическим полем, диапазон измерений был расширен вверх по потоку до  $x=70$  мм. При нескольких частотах звука с помощью указанной методики разделения вихревой и акустической составляющих сигнала датчика определялась интенсивность вихревых колебаний на участке ускоряющегося течения. Если бы существовала локальная область генерации на разгоне участка (например, на носике модели), то, начиная с некоторого значения  $x$ , кривые нарастания возмущений совпали бы с кривыми нарастания, полученными в эксперименте с вибрирующей лентой [4]. Однако в пределах точности настоящих измерений колебания в этой области не были обнаружены. Точки 3 и 6 на фиг. 3 соответствуют точности определения амплитуды возмущений для частот  $f=176$  и  $156$  Гц соответственно и оценивают сверху интенсивность вихревых колебаний. Это означает,

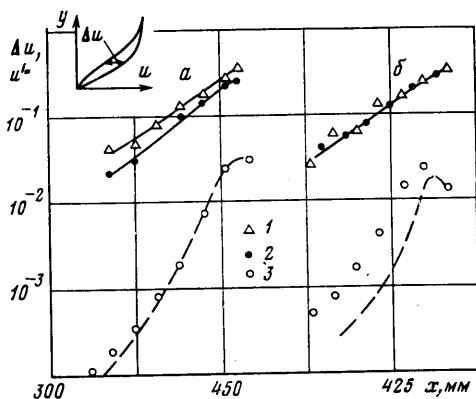
что определяющее значение имеет генерация возмущений в начале области неблагоприятного градиента давления. Если на разгонном участке и происходит порождение колебаний, то они не существенны для развития пограничного слоя ниже по потоку из-за их сильного затухания [4].

В целом основную роль в преобразовании акустических возмущений в волны Толлмина — Шлихтинга в диапазоне неустойчивых частот играет генерация колебаний пограничного слоя в начале области неблагоприятного градиента давления.

**3. Влияние возмущений на среднее течение.** В [4] отмечалось сильное влияние возмущений на



Фиг. 4



Фиг. 5

структуру ламинарного течения в пограничном слое с неблагоприятным градиентом давления и в области отрыва, заключающееся в наполнении профилей средней скорости. В настоящей работе влияние звука на среднее течение изучалось путем измерения величины искажения профиля средней скорости в случае возбуждения пограничного слоя звуком и вибрирующей лентой. Искажение среднего течения можно характеризовать величиной  $\Delta u$  — максимальным отклонением профиля средней скорости от невозмущенного (фиг. 5). На этом рисунке приведены результаты исследования среднего течения в присутствии акустического поля (точки 1 —  $\Delta u$ , штриховая линия — амплитуда вихревой волны, выделенная из общего сигнала) и при возбуждении пограничного слоя вибрирующей лентой (точки 2 — дефект скорости, 3 — амплитуда возмущений в пограничном слое). Величина  $\Delta u$  отнесена к  $u_\infty$ . В первом случае для  $f=85$  Гц (фиг. 5, а) проводились измерения  $\Delta u$  при равных амплитудах вихревых возмущений, генерируемых звуком и лентой; во втором (фиг. 5, б) — для  $f=116$  Гц измерялись амплитуды колебаний пограничного слоя при одинаковой величине искажения среднего течения.

Приведенные результаты показывают, что среднее течение в области неблагоприятного градиента давления заметно изменяется при акустическом возбуждении. Причем перестройка структуры ламинарного течения происходит в основном под влиянием вихревых колебаний, генерируемых звуком, однако, как показывают результаты, существует еще и дополнительное, по-видимому, непосредственное воздействие звука на среднее течение. Следует подчеркнуть, что наполнение профилей средней скорости не есть результат турбулизации течения, а происходит в ламинарном слое под воздействием возмущений с амплитудами порядка 1% и меньше (см. фиг. 5). Вместе с тем вне диапазона неустойчивости, т. е. в отсутствие вихревых возмущений, влияние звука на среднее течение не было обнаружено при уровне звукового давления до 110 дБ.

Изложенные результаты позволяют сделать вывод о том, что в присутствии акустического поля в пограничном слое с продольным градиентом давления генерируются волны Толлмина — Шлихтинга. Возникшие возмущения быстро усиливаются на участке неблагоприятного градиента давления и приводят к существенной перестройке ламинарного течения.

Таким образом, отмеченное в [4] сильное влияние волн Толлмина — Шлихтинга на структуру ламинарного течения в области отрыва пограничного слоя носит общий характер в тех задачах, где под воздействием внешних возмущений возбуждаются собственные колебания пограничного слоя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чжен П. Управление отрывом потока. М.: Мир, 1979. 552 с.
2. Гиневский А. С., Власов Е. В., Колесников А. В. Аэроакустические взаимодействия. М.: Машиностроение, 1978. 177 с.
3. Каравосов Р. К., Прозоров А. Г. Влияние звукового облучения на обтекание крыла при малых числах Рейнольдса. — Тр. ЦАГИ, 1976, вып. 1790. 24 с.
4. Довгаль А. В., Козлов В. В., Косорыгин В. С., Рамазанов М. П. Влияние возмущений на структуру течения в области отрыва. — Докл. АН СССР, 1981, т. 258, № 1, с. 45–48.
5. Айзин Л. Б., Поляков Н. Ф. Генерация волны Толлмина — Шлихтинга звуком на отдельной неровности поверхности, обтекаемой потоком. Новосибирск, 1979. 21 с. (Ин-т теор. и прикл. мех. СО АН СССР. Препринт № 17).
6. Качанов Ю. С., Козлов В. В., Левченко В. Я. Генерация и развитие возмущений малой амплитуды в ламинарном пограничном слое при наличии акустического поля. — Изв. СО АН СССР, Сер. техн. н., 1975, № 13, вып. 3, с. 18–26.
7. Довгаль А. В., Козлов В. В., Косорыгин В. С., Рамазанов М. П. Развитие возмущений в пограничном слое с неблагоприятным градиентом давления. Новосибирск, 1980. 17 с. (Ин-т теор. и прикл. мех. Препринт № 22).
8. Качанов Ю. С., Козлов В. В., Левченко В. Я. Возникновение турбулентности в пограничном слое. Новосибирск: Наука, 1982. 151 с.

Новосибирск

Поступила в редакцию  
25.VI.1982