

УДК 532.526.3.013.4

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ
НА ВНЕШНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ**

А. В. ДОВГАЛЬ, В. В. КОЗЛОВ, В. Я. ЛЕВЧЕНКО

(Новосибирск)

В рамках проблемы восприимчивости пограничного слоя к внешним возмущениям изучен вопрос о сосредоточенном внешнем воздействии на пограничный слой пластины. Указанный тип воздействия моделировался введением во внешний поток возмущения, локализованного над поверхностью пластины. В ходе измерений обнаружено возникновение волн Толлмина — Шлихтинга в пограничном слое, что наряду с результатами работ [1, 2] позволяет расценивать сосредоточенное внешнее воздействие как эффективный способ генерации собственных колебаний пограничного слоя.

1. Вопрос о восприимчивости пограничного слоя к внешним возмущениям как существенная часть проблемы перехода к турбулентности был сформулирован десять лет назад (см. [3]) и состоит в том, посредством каких механизмов внешние малые возмущения (турбулентность основного потока, акустические возмущения, вибрации моделей, шероховатость поверхности и т. д.) возбуждают собственные колебания пограничного слоя. Значение этого вопроса связано с тем, что развитие волн Толлмина — Шлихтинга, представляющее собой начальную, линейную стадию перехода, имеет определяющий характер в том смысле, что спектральный состав и начальная интенсивность собственных колебаний пограничного слоя оказывают большое влияние на последующие стадии перехода.

Теоретические исследования [4–8] показывают, что принципиально возможны как распределенная генерация волн Толлмина — Шлихтинга в пограничном слое [3, 4], так и генерация путем сосредоточенного воздействия [6–8]. Экспериментально были исследованы следующие возможные пути генерации волн Толлмина — Шлихтинга: 1) возбуждение собственных колебаний пограничного слоя в области передней кромки модели; 2) распределенная генерация возмущений в пограничном слое.

В экспериментах, выполненных на гладкой пластине [1], показано, что в случае, когда на пластину набегало монохроматическое вихревое возмущение, представляющее собой вихревую дорожку малой интенсивности, генерируемую расположенной выше по потоку от передней кромки пластины вибрирующей лентой, преобразование периферийной части дорожки на носике пластины приводило к эффективному образованию волны Толлмина — Шлихтинга в пограничном слое (случай 1). Однако взаимодействие пограничного слоя с центральной частью дорожки, распространявшейся над ним, не вызвало образования волны Толлмина — Шлихтинга (случай 2) несмотря на то, что амплитуда возмущения вблизи границы пограничного слоя была достаточно велика, т. е. распределенное воздействие внешнего вихревого возмущения не приводило к возникновению собственных колебаний пограничного слоя [1, 5].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования возможности генерации собственных колебаний пограничного слоя путем сосредоточенного воздействия.

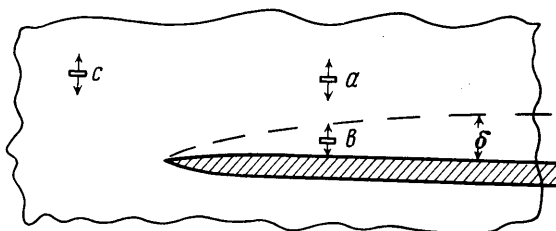
2. Эксперимент проводился в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 (интегральная по спектру степень турбулентности $\epsilon < 0.04\%$) на пластине из оргстекла с эллипсообразным носиком, установленной параллельно потоку. Соотношение полуосей эллипса: 2 мм : 132 мм с рабочей стороны и 8 мм : 132 мм — с противоположной. Схема эксперимента оставалась почти такой же, как и в [9], с той разницей, что исследовались два случая, в которых металлическая лента, натянутая над пластиной на расстоянии $x=251$ мм от ее передней кромки, располагалась последовательно в двух положениях: случай *a* — на высоте $y=9$ мм от поверхности пластины, превышающей толщину пограничного слоя δ в этом сечении примерно вдвое, и случай *b* — в пограничном слое на высоте $y=0.15$ мм от пластины (фиг. 1). Для сравнения на этой же фигуре изображено положение ленты, соответствующее схеме эксперимента [1] (случай *c*).

При пропускании через ленту синусоидального электрического тока она вибрировала в магнитном поле соленоидального электромагнита, внося в случае *a* возмущение во внешний поток, локализованное над поверхностью пластины вне пограничного слоя. Ниже по потоку от ленты это возмущение представляло собой синусоидальную во времени, распространяющуюся вниз по течению монохроматическую волну с частотой, равной частоте вибрации ленты. Таким образом моделировалось локальное воздействие внешнего возмущения на пограничный слой

в отличие от случая *c*, когда пограничный слой подвергался распределенному воздействию. Когда же лента располагалась в самом пограничном слое (случай *b*), в нем заведомо возбуждалась типичная волна Толлмина – Шлихтинга [9, 10].

Измерения проводились в двух указанных случаях *a* и *b* с целью определения характера возмущения, генерируемого в пограничном слое при верхнем положении ленты, и сравнении его с волной Толлмина – Шлихтинга, развивающейся в пограничном слое.

Регистрация осуществлялась комплексом аппаратуры на базе термоанемометра типа 55 DOI DISA с линеаризованной характеристикой и с использованием частотного анализатора FAT-1 Rohde und Schwarz с полосой пропускания 4 гц для выде-



Фиг. 1

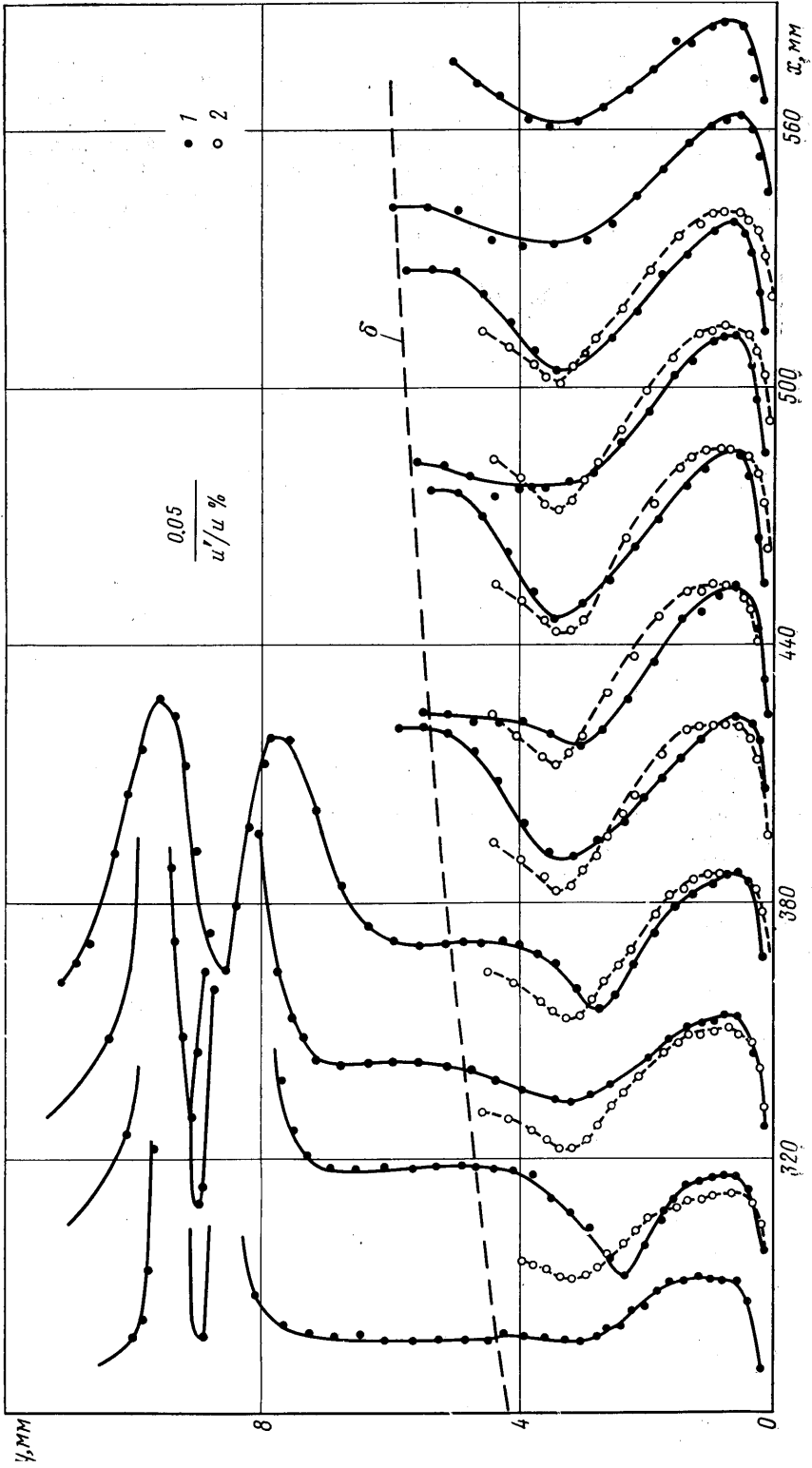
ления исследуемой волны. Вдоль потока измерения проводились в диапазоне $251 \text{ мм} < x < 700 \text{ мм}$, нижняя граница которого определялась положением ленты, а верхняя – началом области влияния возмущений, вносимых ее креплениями. Диапазон измерений по поперечной координате ($0 < y < 12 \text{ мм}$) охватывал пограничный слой и прилегающую область внешнего течения. Скорость внешнего потока и равнялась 5.8 м/сек .

В ходе измерений продольной компоненты пульсаций скорости, выполненных для различных значений частоты колебаний ленты в ее верхнем положении, в пограничном слое были отмечены монохроматические во времени вихревые колебания такой же частоты. Свойства обнаруженных возмущений изучались в ходе построения профилей продольной компоненты пульсаций скорости, кривых нарастания, определения нейтральных точек и скорости распространения этих возмущений.

3. На фиг. 2 изображены профили продольной компоненты пульсаций скорости u' для частоты $f=73 \text{ гц}$ (соответствующее значение частотного параметра $F=2\pi f\nu/u^2=218 \cdot 10^{-6}$) с ростом координаты x в случаях *a* (точки 1) и *b* (точки 2). Для случая *a* наряду с распределением возмущения в пограничном слое представлены профили пульсаций скорости в вихревой дорожке. Ее интенсивность быстро уменьшается при удалении от ленты: если в первом сечении максимальная амплитуда возмущения достигает 1% от средней скорости потока, то при $x=350 \text{ мм}$ она равна 0.12%. В трех первых сечениях профиль исследуемого возмущения, в пограничном слое существенно отличается от профиля волны Толлмина – Шлихтинга; в этой области значительное искажение вносится периферийной частью вихревой дорожки. По мере удаления от ленты вихревая дорожка затухает в большей степени вблизи поверхности пластины (см. фиг. 1 в работе [1]), и на достаточно большом расстоянии от ленты возмущение в глубине пограничного слоя развивается как волна Толлмина – Шлихтинга. В то же время в районе границы пограничного слоя происходит сложение внешнего возмущения с волной в пограничном слое, и, поскольку скорости их распространения, как показали фазовые измерения, различны, результирующий сигнал представляет собой биения по координате x .

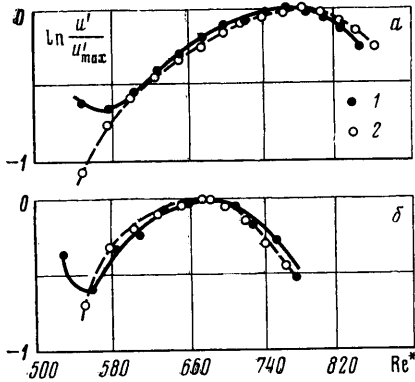
Скорости распространения возмущений в пограничном слое и в следе за лентой определялись путем фазовых измерений с использованием измерителя разности фаз типа Ф2-13. Фазовая скорость волны для случая *a* в пограничном слое оказалась равной примерно 0.4 от скорости внешнего потока, что совпадало с фазовой скоростью для случая *b* и являлось характерной величиной волны Толлмина – Шлихтинга. Возмущение, создаваемое лентой вне пограничного слоя, распространялось во внешнем потоке со скоростью, близкой к скорости внешнего течения.

На фиг. 3 представлены кривые нарастания, построенные по максимуму возмущения в пограничном слое для частот $f=60 \text{ гц}$ ($F=180 \cdot 10^{-6}$) – фиг. 3, *a* и $f=73 \text{ гц}$ ($F=218 \cdot 10^{-6}$) – фиг. 3, *б* в случае *a* (точки 1) наряду с кривыми нарастания волн Толлмина – Шлихтинга соответствующих частот (случай *b*, точки 2). Сравнение показывает, что поведение кривых нарастания в основном совпадает, за исключением области вблизи ленты; положению ленты соответствует $Re^* = u\delta^*/\nu =$

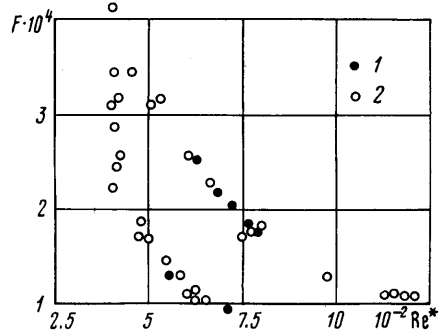


Фиг. 2

$=1.72\sqrt{ux/\nu}=516$ (δ — толщина вытеснения). Это расхождение является естественным; оно отражает протекание процесса сепарации возмущений в пограничном слое, в ходе которого из спектра возмущения, вносимого лентой в пограничный слой, происходит выделение волны со скоростью распространения волны Толлмина — Шлихтинга, в то время как колебания с другими фазовыми скоростями распространения затухают. Суперпозиция затухающих волн с волной Толлмина — Шлихтинга приводит к появлению точки минимума, которая, однако, не имеет никакого отношения к кривой нейтральной устойчивости. С увеличением расстояния от ленты (возрастанием числа Re^*) в пограничном слое практически остается



Фиг. 3



Фиг. 4

одна волна Толлмина — Шлихтинга, и, как видно из фиг. 2 и 3, точка максимума кривой нарастания уже является нейтральной точкой.

На фиг. 4 приведены нейтральные точки рассматриваемых возмущений (точки 1), которые довольно хорошо согласуются с ранее полученными результатами для малых возмущений, развивающихся в пограничном слое на плоской пластине (точки 2 из работы [9]). Две нейтральные точки, относящиеся к случаю *a*, на нижней ветви нейтральной кривой соответствуют низкочастотным возмущениям, для которых сепарация закончилась еще в области затухания волны Толлмина — Шлихтинга. Точки минимума для остальных исследованных частот лежат во внутренней области нейтральной кривой и не нанесены на график, поскольку не являются нейтральными точками.

4. Совпадение характеристик волн, возбужденных в случаях *a* и *b*, фактически еще раз подтверждает выводы работы [1]. Возбуждение волн в случае *a* происходит в окрестности сосредоточенного воздействия, а далее вниз по потоку развитие происходит практически независимо от условий на внешней границе пограничного слоя, где еще имеют место значительные пульсации скорости. Иными словами, сколько-нибудь заметная распределенная передача энергии к волнам, развивающимся в пограничном слое, отсутствует. Последние, как следует из изложенных результатов, являются собственными колебаниями пограничного слоя, т.е. волнами Толлмина — Шлихтинга, генерация которых имеет место вследствие сосредоточенного воздействия на пограничный слой.

Таким образом, экспериментальные результаты данной работы в совокупности с результатами работ [1, 2] показывают, что сосредоточенное воздействие на пограничный слой, теория которого дана в [6-8], является гораздо более сильным механизмом возбуждения волн Толлмина — Шлихтинга по сравнению с распределенным воздействием. Физически это вполне объяснимо. Конечно, любое внешнее возмущение возбуждает волны в пограничном слое. Для возбуждения собственных колебаний пограничного слоя нужно, чтобы частоты и длины возбуждаемых волн совпадали с частотами и длинами волн Толлмина — Шлихтинга. Для дозвуковых скоростей потока это практически нереализуемо при наложении распределенных акустических или вихревых внешних возмущений, имеющих фазовые скорости и, следовательно, длины волн, существенно отличные от соответствующих характеристик волн Толлмина — Шлихтинга. При сосредоточенном воздействии заданной частоты резкое изменение амплитуды возмущения по продольной координате имеет следствием возбуждение в пограничном слое пакета различных длин волн, в том числе с длинами волн, соответствующими волнам Толлмина — Шлихтинга, и

в этом смысле нет принципиальной разницы между возбуждением пограничного слоя на передней кромке [1], или ниже по потоку звуковым пучком [7], или локальным изменением скорости вне пограничного слоя.

Поступила 27 III 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов Ю. С., Козлов В. В., Левченко В. Я. Возникновение волн Толлмина — Шлихтинга в пограничном слое при воздействии внешних возмущений. Изв. АН СССР, МЖГ, 1978, № 5.
2. 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. наук, вып. 3, 1975, № 13.
3. Reshotko E. Boundary-layer stability and transition. Ann. Rev. Fluid Mech., vol. 8, Palo Alto, Calif., 1976.
4. Mungur P. On the sensitivity of shear layers to sound. AIAA Paper, 1977, No. 1369.
5. Rogler H., Reshotko E. Disturbances in a boundary-layer introduced by a low intensity array of vortices. SIAM J. Appl. Math., 1975, vol. 28, No. 2.
6. Fasel H. Reaktion von zweidimensionalen, laminaren, inkompressiblen Grenzschichten auf periodische Störungen in der Aussenströmung. Z. Angew. Math. und Mech., 1977, dB 57, H. 5.
7. Tam C. K. W. Excitation of instability waves in a two-dimensional shear layer by sound. J. Fluid Mech., 1978, vol. 89, pt 2.
8. Качанов Ю. С., Козлов В. В., Левченко В. Я., Максимов В. П. Преобразование внешних возмущений в волны пограничного слоя. Числ. методы механики сложной среды, 1978, т. 9, № 2.
9. Качанов Ю. С., Козлов В. В., Левченко В. Я. Экспериментальное исследование влияния охлаждения на устойчивость ламинарного пограничного слоя. Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук, вып. 2, 1974, № 8.
10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., «Наука», 1969.

УДК 532.543:519.3

ОБ ОДНОЙ ВАРИАЦИОННОЙ ЗАДАЧЕ ГИДРОДИНАМИКИ ОТКРЫТЫХ РУСЛ

Г. А. АТАНОВ, С. Т. ВОРОНИН

(Донецк)

Решена задача об управлении неустановившимся движением воды в открытом русле канала, ограниченного насосной станцией. Определяется закон изменения расхода насосной станции, обеспечивающий наименьшие затраты на подачу воды из канала. Решение приводится методом неопределенных множителей Лагранжа. Приводятся примеры расчета.

1. Рассмотрим длинный горизонтальный канал без трения с прямоугольным сечением русла, ограниченный справа насосной станцией. В этом случае движение воды описывается системой уравнений [1]

$$(1.1) \quad L_1 \equiv \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(gb \frac{H^2}{2} + \frac{Q^2}{bH} \right) = 0, \quad L_2 \equiv \frac{\partial (bH)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

где Q — расход потока; g — ускорение силы тяжести; b — ширина поперечного сечения потока; H — глубина потока. Начало отсчета находится в створе насосной станции.

Система (1.1) гиперболическая и имеет два семейства характеристик со следующими условиями на них:

$$(1.2) \quad L_3 \equiv \frac{dx}{dt} - (V \pm c) = 0$$

$$(1.3) \quad L_4 \equiv dQ - b(V \mp c) dH = 0$$