

УДК 532.526

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ<sup>1</sup>**

**БАБЕНКО В. В., ЮРЧЕНКО Н. Ф.**

Неровности и вибрации поверхности, турбулентность набегающего потока и другие факторы приводят к проникновению в пограничный слой трехмерных возмущений. Классические исследования переходного пограничного слоя были выполнены при малой степени турбулентности и введении плоской волны возмущения. В настоящей работе внимание уделяется развитию трехмерных возмущений, создаваемых в модельном эксперименте как механическим способом, так и при помощи плоских эластичных пластин при различных числах Рейнольдса. Анализ результатов проводится на основе измеренных спектральных и корреляционных характеристик.

1. Физическая картина взаимодействия в пограничном слое трехмерных возмущений определялась по результатам визуализации поля течения теллур-методом [2] и измерений осредненной  $U$  и пульсационной  $u'$  продольных составляющих скорости, а также спектральной плотности мощности  $u'$ . Измерения выполнялись при помощи лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) [3] и термоанемометрической аппаратуры DISA 55D01 [4].

Метод исследования реакции пограничного слоя на вводимые возмущения состоял в том, что вначале на гидродинамическом стенде проводилась визуализация течения в пограничном слое на разных этапах естественного перехода [2, 5]. Особое значение придавалось фотографированию визуализированных профилей  $U(z)$  вдоль рабочего участка в направлении оси  $x$  при различных значениях  $0 < y < \delta$  по толщине пограничного слоя и при ряде значений скорости основного потока  $U_\infty$ . Затем в характерных сечениях по  $z$  (в «пиках»  $z_1$ , «впадинах»  $z_2$  и промежутках между ними  $z_3$ ) измерялись  $U(y)$  и  $u'(y)$  на последовательных этапах естественного перехода [5, 6], а также спектральные и корреляционные характеристики потока [4]. Полученные результаты служили эталонными при исследовании восприимчивости пограничного слоя к различным возмущениям.

Введение трехмерных возмущений в пограничный слой осуществлялось двумя способами. В первом, традиционном, способе использовалась решетка вихреобразователей, которая устанавливалась выше по течению относительно места измерения внутри пограничного слоя, но «сверху» по отношению к обтекаемой границе [6]. Масштаб возмущений при этом определялся расстоянием между вихреобразователями  $\lambda_*$  и их размерами (1 — малые вихреобразователи, 2 — средние, 3 — большие). Второй способ основан на создании возмущений обтекаемой эластичной поверхностью, когда трехмерные возмущения генерировались «снизу» от обтекаемой границы. Здесь параметры возмущений зависели от конструкции, механических свойств применяемых пластин [7] и шага  $z_*$  изменения механических характеристик пластин по  $z$ .

<sup>1</sup> Доклад на V съезде по теоретической и прикладной механике. Алма-Ата, 1981 [1].

Первоначальные данные реакции пограничного слоя на вводимые трехмерные возмущения получены при анализе визуализированных профилей  $U(z)$  и измеренных профилей скорости  $U(y)$  и  $u'(y)$  как для жестких [6, 8], так и для эластичных пластин [9]. Измерение спектральных характеристик в данном цикле исследований проводилось при числах Рейнольдса  $2,2 \cdot 10^5$ ;  $4,4 \cdot 10^5$  и  $1,3 \cdot 10^6$ . Для используемой установки [2] эти величины  $Re$  соответствовали этапам перехода, которые определяются наличием в пограничном слое волн Толлмина — Шлихтинга, формированием системы продольных вихрей и развитой турбулентности. Датчики термоанемометра устанавливались на высоте  $4 \cdot 10^{-3}$  м от обтекаемой поверхности, т. е. в области наиболее интенсивного взаимодействия вводимых и естественных возмущений (в районе расположения по  $y$  максимумов пульсаций), и на расстоянии  $5 \cdot 10^{-2}$  м вниз по потоку от вихреобразователей. Как и профили скорости, спектры регистрировались при трех значениях  $z$ :  $z_1$ ,  $z_2$  и  $z_3$ .

Результаты измерений нормировались так, что

$$\int_0^{\infty} \frac{E(k)}{\langle u'^2 \rangle} dk = 1$$

где  $E$  — спектральная плотность мощности продольных пульсаций скорости, см;  $k$  — волновое число, см $^{-1}$ ;  $\langle u'^2 \rangle$  — среднеквадратичное значение  $u'$ . Обработка спектральных характеристик на ЭВМ описана в [4].

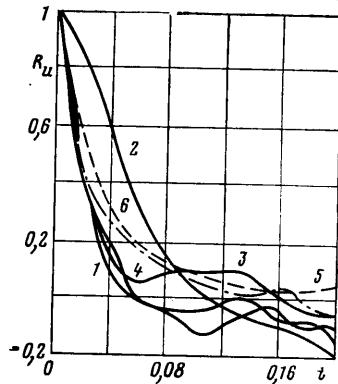
Спектральные кривые, характеризующие восприимчивость пограничным слоем трехмерных возмущений при обтекании жесткой поверхности, приведены в [9].

Отличительными признаками по сравнению с турбулентными спектрами (фиг. 2, 3, кривые 1, 2 [4]) являются (кривые 3): 1) провалы кривых в определенных частях спектра, наиболее выраженные в области больших волновых чисел; 2) четкие максимумы на низких частотах, 3) резкие всплески при некоторых величинах  $k$ ; 4) различная «гладкость» кривых в зависимости от этапа перехода [9].

2. Результаты измерения спектральных характеристик при взаимодействии в пограничном слое трехмерных возмущений, генерируемых «сверху» и «снизу» от обтекаемой пластины, представлены на фиг. 2, 3. Группы кривых, составляющие последовательные серии, смещены друг относительно друга по оси абсцисс на одну ячейку масштабной сетки. В сериях опытов *a*, *б* исследованы сложные взаимодействия трехмерных возмущений в пограничном слое на гладкой однородной эластичной пластине 1, а в сериях *в*, *г* — на анизотропной пластине 2, генерирующей «снизу» трехмерные возмущения с длиной волны  $\lambda_* = 1,8 \cdot 10^{-3}$  м. Механические свойства этих пластин приведены в [7], а условия проведения измерений приведены ниже.

Серия опытов	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>
Пластина	1	1	2	2
Вихреобразователи	2	3	3	2
$\lambda_* \cdot 10^3$ , м	8	12	8	8
$z_* \cdot 10^3$ , м	—	—	1,8	1,8
$U_{\infty} \cdot 10$ , м/с	2,2	2,2	2,0	2,0
$y/\delta$	0,133	0,133	0,17	0,17

На фиг. 2, 3 кривые 1, 2 соответствуют турбулентным спектрам при  $y/\delta = 0,21$  и  $0,063$  [4]; кривые 3 — спектрам при восприимчивости пограничным слоем жесткой пластины трехмерных возмущений, генерируемых «сверху» [9], при  $z = z_1$  и тех же условиях, что указаны выше; кривые



Фиг. 1

4, 5, 6 — спектрам при сложных взаимодействиях в пограничном слое, когда датчик термоанемометра устанавливался по отношению к расположенным «сверху» вихреобразователям соответственно при  $z=z_1$ ,  $z_2$  и  $z_3$ .

При сложных взаимодействиях трехмерных возмущений в пограничном слое сохраняются особенности, отмеченные выше для простых взаимодействий на жесткой пластине. Отличие состоит в том, что эти эффекты сглажены.

Уменьшение провалов в инерционной подобласти спектра ( $0,8 \text{ см}^{-1} < k < 3 \text{ см}^{-1}$ ) согласуется с видом осредненных и пульсационных профилей. Последние значительно меньше изменяются по  $z$  [9] по сравнению с аналогичными профилями для жесткой поверхности, что говорит о менее развитой системе продольных вихрей, создаваемых вихреобразователями, или об изменении размеров и формы вихрей. Из этого следует, что при сложных взаимодействиях происходит не только перераспределение энергии возмущений между спектральными составляющими, но и изменение формы и структуры вихрей за счет свойств обтекаемой поверхности и особенностей взаимодействия трехмерных возмущений, генерируемых «сверху» и «снизу».

Сложные взаимодействия отличаются от простых следующими особенностями спектральных характеристик пограничного слоя: 1) уменьшением интенсивности высокочастотных возмущений; 2) большей наполненностью спектральной кривой в инерционной подобласти; 3) увеличением количества и меньшей выраженностью дискретных максимумов. Изменение параметров возмущающего движения или применение других пластин не меняет указанного общего характера и отличительных признаков спектрального распределения мощности пульсаций.

На фиг. 1 приведены кривые коэффициентов корреляции  $R_u$ . Данные измерений, которые проводились при той же координате  $y$ , что и предыдущие, характеризуют турбулентное обтекание эластичной пластины (шифр кривых  $10$  по обозначениям работы [7]) при  $U_\infty=0,6$  м/с без действия вихреобразователей (кривая 6). Кривые 1, 2 получены при взаимодействии естественных возмущений пограничного слоя жесткой пластины с трехмерными возмущениями, создаваемыми соответственно при  $U_\infty=0,2$  м/с,  $z=z_3$  и  $U_\infty=0,1$  м/с,  $z=z_1$  вихреобразователями 2 при  $\lambda_* = 8 \cdot 10^{-3}$  м (простые взаимодействия). Кривые 3, 4 получены на тех же пластинах, что и в сериях  $a$ ,  $z$  (фиг. 1) при  $z=z_1$  и  $z=z_3$  (сложные взаимодействия).

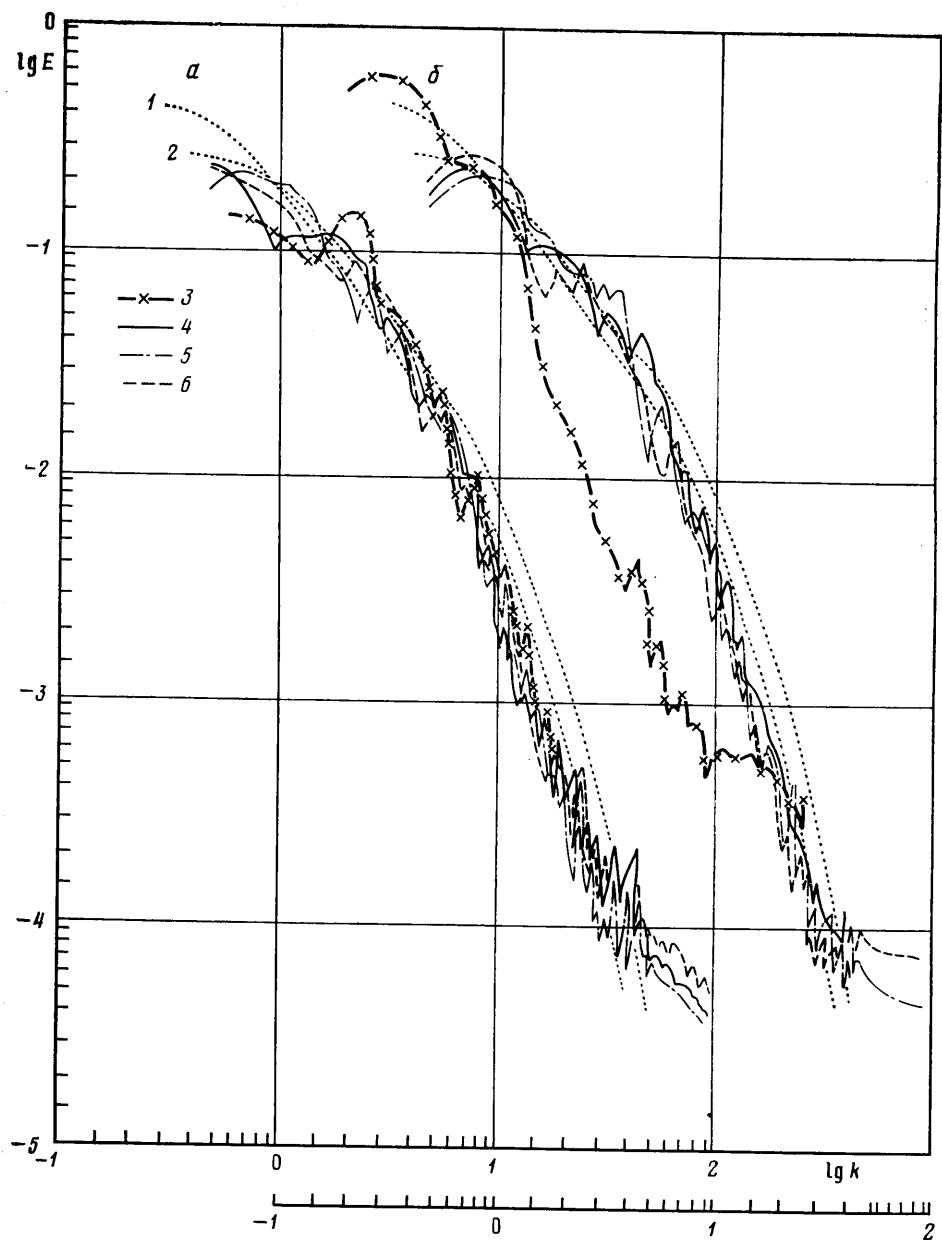
Известно, что интегральный временной масштаб

$$T = \int_0^{\infty} R_u(t) dt$$

характеризует среднюю продолжительность действия турбулентности в фиксированной точке и определяется масштабами длины  $L_0$  и скорости  $u$ :  $T \sim L_0/u$ .

В работе [10] показано, что второй максимум автокорреляционной кривой соответствует периоду выбросов из вязкого подслоя. Отсюда можно заключить, что турбулентное обтекание эластичной пластины (кривая 6) сопровождается уменьшением величины  $T$  по сравнению с обтеканием жесткой поверхности (кривая 5). Это свидетельствует об увеличении частоты выбросов из вязкого подслоя или, другими словами, об изменении баланса энергии турбулентного пограничного слоя [11] и косвенно согласуется с результатами измерения кинематических и спектральных характеристик [8, 9].

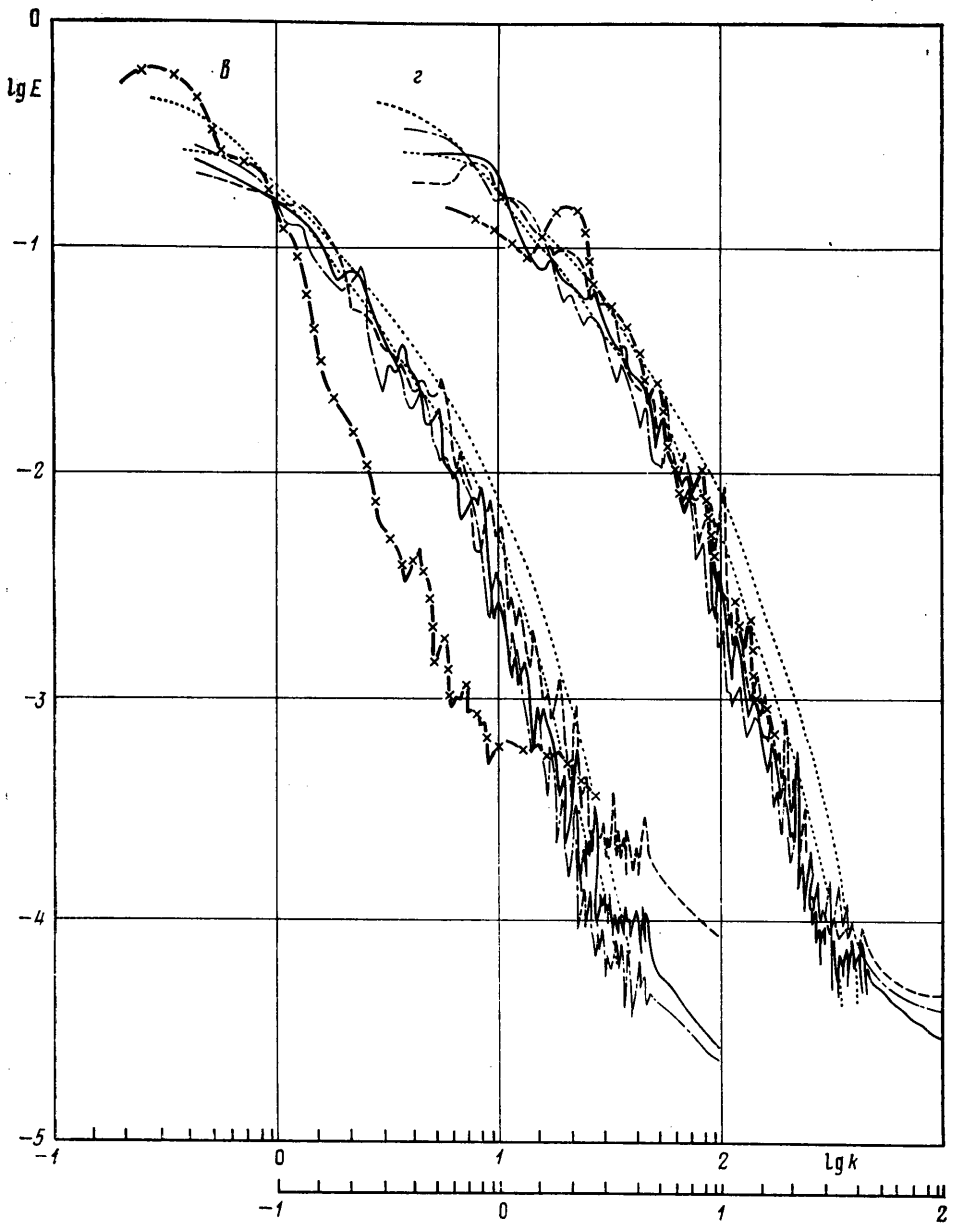
Известно, что в вязком подслое турбулентного пограничного слоя стадии выбросов предшествует стадия развития продольных вихревых возмущений. Исходя из аналогии развития возмущений в вязком подслое



Фиг. 2

и в переходном пограничном слое [11], можно предположить, что вторые максимумы корреляционных кривых 1, 3, 4 также характеризуют разрушение системы продольных вихрей, но только в переходном пограничном слое. Это предположение подтверждается видом кривой 2 без второго максимума, которая соответствует начальным этапам перехода пограничного слоя.

При уменьшении  $U_\infty$  до 0,2 м/с (кривые 1, 3, 4), т. е. в переходном пограничном слое, закономерно должен возрастать временной масштаб. Однако введение трехмерных возмущений независимо от типа обтекаемой поверхности при  $t < 0,03$  с приводит к равенству коэффициентов автокорреляции в этих случаях (кривые 1, 3, 4) и в случае естественного турбулентного обтекания эластичной пластины (кривая 6). Наибольшее различие коэффициентов корреляции имеет место, как и на фиг. 2, 3, в области



Фиг. 3

промежуточных масштабов:  $0,04 \text{ с} < t < 0,1 \text{ с}$ . При дальнейшем уменьшении скорости обтекания жесткой поверхности и тех же параметрах возмущающего движения происходит увеличение коэффициентов  $R_u$  до  $t \approx 0,08 \text{ с}$  (кривая 2). Здесь более существенным оказывается влияние параметров невозмущенного потока, а не вносимых возмущений. Следует отметить, что при искусственной генерации вихревых возмущений, начиная с времени задержки  $t \approx 0,06 \text{ с}$ , наблюдаются отрицательные значения коэффициентов корреляции  $R_u$ . Последнее так же, как и провалы спектральных кривых в инерционной подобласти, может служить свидетельством наличия в пограничном слое трехмерных возмущений типа системы продольных вихрей.

3. Определение структуры возмущающего движения как в случае естественного развития процесса перехода к турбулентности, так и при

введении в пограничный слой трехмерных возмущений позволяет вычислить параметр, характеризующий безразмерный масштаб регулярных трехмерных возмущений  $\lambda^+ = \lambda_* u^* / \nu$ , где  $u^*$  — динамическая скорость,  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости.

Для вязкого подслоя турбулентного пограничного слоя жесткой пластины  $\lambda^+ = 80-100$ , а отношение  $u^*/U_\infty$  изменяется в зависимости от числа Рейнольдса в пределах  $(3,6-4,7) \cdot 10^{-2}$  [10, 12] (в настоящих измерениях эта величина составляла  $(4,5-5) \cdot 10^{-2}$ ). Так как уже в ламинарном пограничном слое при естественном переходе была зафиксирована трехмерная деформация плоской волны [2], а вносимое в пограничный слой плоское возмущение очень быстро становилось трехмерным, то в соответствии с измеренными параметрами  $\lambda_*$  были вычислены значения  $\lambda^+$ . На начальных этапах естественного перехода  $u^*/U_\infty = (2-3,5) \cdot 10^{-2}$  и  $\lambda^+ = 90-130$ . При исследовании восприимчивости пограничным слоем трехмерных возмущений на жесткой пластине (простые взаимодействия) на различных этапах перехода [8]  $u^*/U_\infty$  изменялись в тех же пределах, а  $\lambda^+ = 50-60$  при  $U_\infty = 0,1$  м/с (плоские волны Толлмина — Шлихтинга),  $70-100$  при  $U_\infty = 0,2$  м/с (этап вихрей Бенни — Лия) и  $100-140$  при  $U_\infty = 0,6$  м/с (турбулентный пограничный слой). Величина  $\lambda^+$  зависит не только от этапа перехода, но и от масштаба вносимых трехмерных возмущений.

При обтекании эластичных пластин турбулентным пограничным слоем отношение  $u^*/U_\infty$  было меньше, чем на жесткой пластине, а  $\lambda^+$  — больше ( $\lambda^+ \approx 120-200$ ). При сложных взаимодействиях в настоящих опытах в переходном пограничном слое  $\lambda^+ \approx 70$ , что близко к нижнему значению этого параметра для случая обтекания жесткой пластины. Это объясняется значительным уменьшением величин  $u^*$  за счет уменьшения касательных напряжений, которое в свою очередь обусловлено видоизменением формы профилей скорости в пограничном слое. В некоторых случаях взаимодействия возмущений на эластичных пластинах в переходном пограничном слое  $\lambda^+ = 10-30$ , т. е. существенно меньше, чем при введении трехмерных возмущений на жесткой пластине.

Таким образом, применяемые пластины ослабляют влияние на пограничный слой вносимых извне трехмерных возмущений. При этом происходит изменение структуры возмущающего движения: в переходном пограничном слое масштаб продольных вихревых систем уменьшается, а в вязком подслое турбулентного пограничного слоя увеличивается. Область интенсивного проявления взаимодействия возмущений сосредоточена в слое  $0 < y/\delta^* < 1,5$ . На основе результатов измерения спектральных или корреляционных характеристик можно определить также динамические свойства возмущающего движения: период обновления продольных вихревых структур в вязком подслое турбулентного пограничного слоя  $T$  или обратную величину — частоту выбросов  $f$ .

По данным фиг. 1 для жесткой поверхности (кривая 5) в турбулентном пограничном слое  $T = T_1 = 0,22$  с, для эластичной пластины (кривая 6)  $T_2 = 0,16$  с. В переходном пограничном слое для жесткой поверхности (кривая 1)  $T_3 = 0,14$  с, для эластичных пластин 1 (кривая 3)  $T_4 = 0,14$  с и 2 (кривая 4)  $T_5 = 0,15$  с. Безразмерный параметр  $T^+$ , вычисленный на основе экспериментальных данных по формуле  $T^+ = Tu^{*2}/\nu$ , имеет следующие значения:  $T_1^+ = 198$ ,  $T_2^+ = 92$ ,  $T_3^+ = 4,7$ ,  $T_4^+ = 14,8$ ,  $T_5^+ = 9,5$ . Величина  $T_1^+$  для жесткой пластины хорошо согласуется с данными [10], которые в зависимости от  $y^+$  изменяются в пределах  $220-400$ . Уменьшение величины  $T^+$  для эластичных пластин объясняется тем, что под влиянием возмущающего движения их поверхность колеблется [7], увеличивая частоту выбросов из вязкого подслоя. Уменьшение  $T^+$  в переходном пограничном слое связано с уменьшением величины  $u^*$ , а различие  $T_4^+$  и  $T_5^+$  обусловлено механическими свойствами эластичных пластин.

Параметр  $T^+$  может быть вычислен также по формуле  $T^+ = U_\infty T / \delta^*$ . Соответственно получено:  $T_1^+ = 3$ ,  $T_2^+ = 2,2$ ,  $T_5^+ = 0,8$ . Значения  $T^+$  для жесткой пластины изменяются в зависимости от  $Re$  в пределах 4–10 [10].

Таким образом, на основании полученных результатов можно заключить: 1) механизм развития и структура возмущающего движения в переходном пограничном слое и в вязком подслое турбулентного пограничного слоя жесткой пластины, как и предполагалось в [11], характеризуются одинаковыми чертами и имеют единую природу; 2) восприимчивость пограничного слоя при сложных взаимодействиях в сильной степени зависит от механических свойств и структуры обтекаемой поверхности и параметров вносимых возмущений. При этом имеют место глубокие изменения всех кинематических характеристик, в том числе профилей осредненных и пульсационных скоростей по  $y$  и  $z$ , спектральных и корреляционных характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Бабенко В. В., Юрченко Н. Ф.* Восприимчивость пограничного слоя к возмущениям типа вихрей Гертлера.— В кн.: Аннот. докл. V Всесоюз. съезда по теорет. и прикл. механике. Алма-Ата: Наука, 1981, с. 38.
2. *Козлов Л. Ф., Бабенко В. В.* Экспериментальные исследования пограничного слоя. Киев: Наук. думка, 1978. 184 с.
3. *Иванов В. П., Бабенко В. В., Блохин В. А., Козлов Л. Ф., Коробов В. И.* Исследование поля скоростей в гидродинамическом стенде малой турбулентности с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости.— Инж.-физ. журн., 1979, т. 37, № 5, с. 818–824.
4. *Канарский М. В., Бабенко В. В., Воропаев Г. А.* Измерение кинематических характеристик турбулентного пограничного слоя на пластине и обработка полученной информации на ЭВМ.— В кн.: Гидромеханика. Вып. 45. Киев, 1982, с. 30–36.
5. *Юрченко Н. Ф., Бабенко В. В., Козлов Л. Ф.* Экспериментальное исследование гертлеровской неустойчивости в пограничном слое.— В кн.: Стратифицированные и турбулентные течения. Киев: Наук. думка, 1979, с. 50–59.
6. *Юрченко Н. Ф.* К методике экспериментального исследования системы продольных вихрей в пограничном слое.— Инж.-физ. журн., 1981, т. 41, № 6, с. 996–1002.
7. *Канарский М. В.* Экспериментальное исследование динамического модуля упругости эластичной пластины.— В кн.: Бионика. Вып. 16. Киев: Наук. думка, 1981, с. 98–101.
8. *Бабенко В. В., Иванов В. П., Юрченко Н. Ф.* Измерение лазерным анемометром восприимчивости пограничного слоя к плоским и трехмерным возмущениям.— Автометрия, 1982, № 3, с. 91–96.
9. *Бабенко В. В., Козлов Л. Ф., Юрченко Н. Ф., Иванов В. П.* Пограничный слой при воздействии плоских и трехмерных возмущений.— В кн.: Пристенные струйные потоки. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984, с. 45–51.
10. *Kim H. T., Kline S. J., Reynolds W. C.* The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer.— J. Fluid Mech., 1971, v. 50, № 1, p. 133–160.
11. *Бабенко В. В.* К взаимодействию потока с эластичной поверхностью.— В сб.: Механизмы турбулентных потоков. М.: Наука, 1980, с. 292–300.
12. *Blackwelder R. F., Haritonidis J. H.* Scaling of the bursting frequency in turbulent boundary layers.— J. Fluid Mech., 1983, v. 132, p. 87–103.

Киев

Поступила в редакцию  
9.XI.1982