

УДК 532.526

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПОТОКА НА ТЕЧЕНИЕ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

С. М. ГОРЛИН, И. М. ЗРАЖЕВСКИЙ

(Москва)

На основе обработки данных опытов получена универсальная зависимость турбулентности в пограничном слое на пластине от расстояния до нее, которую можно по аналогии с законом дефекта средней скорости назвать законом дефекта пульсационной составляющей скорости.

В последнее время большое внимание уделяется изучению влияния турбулентности внешнего потока на обтекание всевозможных тел, сооружений и неровностей земной поверхности [1, 2].

Одной из важнейших характеристик турбулентности потока является его степень турбулентности K , учет которой при экспериментах является весьма существенным [3]. В связи с этим актуальным становится вопрос о влиянии турбулентности внешнего потока на характеристики течения в пограничном слое.

Существующие теории турбулентного пограничного слоя не учитывают влияния турбулентности внешнего потока и не позволяют рассчитать распределение энергии турбулентности в пограничном слое.

С целью получения опытных данных по распределению скорости и энергии турбулентности в пограничном слое при различной степени турбулентности внешнего потока в аэродинамической трубе А-6 Института механики МГУ были проведены специальные эксперименты.

Аэродинамическая труба А-6 замкнутого типа, с открытой рабочей частью эллиптического сечения. Размер сечения рабочей части $4 \times 2,34 \text{ м}^2$, длина 4 м. Критическое число Рейнольдса для шара $d = 0,15 \text{ м}$ равно 375 000, что соответствует степени начальной турбулентности для продольной компоненты $\epsilon_0 = 0,2\%$ или числу $K = 0,002$. Скол потока в ядре рабочей части не превышает $0,5^\circ$. Для изменения степени турбулентности в рабочей части использовались специальные турбулизирующие сетки, устанавливаемые на обрете сопла [4]. Эти сетки, как показали предварительные измерения, позволяют получить в рабочей части равномерный по скорости и изотропно турбулизованный поток с числами K до 0,1 и более. В описываемых ниже опытах число K изменялось от 0,003 до 0,06. Измерения средней скорости и продольной составляющей пульсационной скорости производились с помощью термоанемометра с постоянной температурой нити типа «DISA Elektronik». Опыты проводились на плоской пластине («экране») длиной 4 м при различных значениях шероховатости ее поверхности и различных скоростях набегающего потока.

Для изменения шероховатости пластина обклеивалась гладкой бумагой и двумя типами шлифовальной шкурки. По измерениям профилографом средняя высота бугорков шероховатости оказалась равной для гладкой бумаги в пределах $10 \div 35 \text{ мк}$; для шкурки ГОСТ 5009-68-300 мк и для шкурки ГОСТ 6456-62-400 мк .

Измерения профилей средней скорости и продольной составляющей пульсационной скорости проводились в вертикальных сечениях на расстояниях 0,5, 1,45, 2,46, 3,45 м от переднего края пластины.

Непосредственные результаты измерений представлены для ряда случаев на фиг. 1, 2.

На фиг. 1 приведены профили средней скорости при различных числах K и шероховатости поверхности h_0 . Для 1, 2, 3, 4, 5 $K = 0,003, 0,020, 0,036, 0,003, 0,018$ и $h_0 = 20, 20, 20, 40, 400 \text{ мк}$ соответственно.

На фиг. 2 приведено распределение степени турбулентности по продольной составляющей пульсационной скорости для различных чисел Re и тех же значений h_0 .

Для 1, 2, 3, 4, 5 $Re = 5,5 \cdot 10^6, 4,9 \cdot 10^6, 2,8 \cdot 10^6, 6,4 \cdot 10^6, 4,8 \cdot 10^6$ и $h_0 = 20, 20, 20, 400 \text{ мк}$. Профили скорости при малых числах K представлены на фиг. 3, а при больших — на фиг. 4. Сплошная линия на этих фигурах соответствует логарифмическому закону.

Условные обозначения фиг. 3 и 4 представлены ниже в табл. 1.

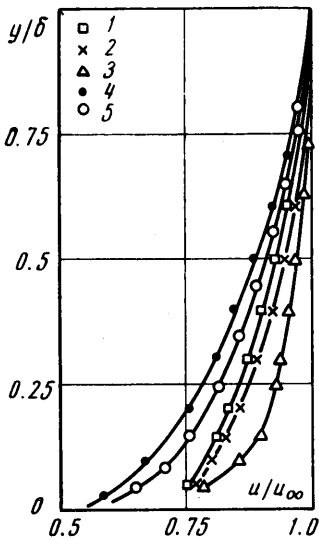
Как видно из фиг. 3 при малой внешней турбулентности измеренное распределение средней скорости в пограничном слое хорошо согласуется с измерениями других авторов и отражает ту же тенденцию влияния шероховатости, которая отмечается, например, у Ротта [5]. В этом случае часть пограничного слоя, описываемая логарифмическим законом, занимает 15% всей его толщины.

При увеличении числа K до 0.04, т. е. на порядок, в среднем весь пограничный слой можно описать известным логарифмическим законом

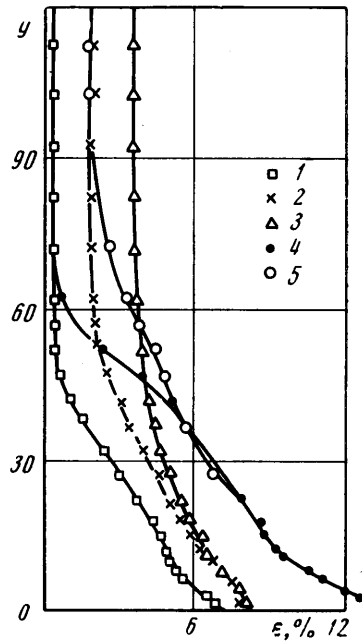
$$U = \frac{u_\infty - u}{v_*} = -\frac{1}{\kappa} \lg \eta + C \quad \left(\eta = \frac{v_* y}{u_\infty \delta_*} \right) \quad (1)$$

Здесь v_* — динамическая скорость, δ_* — толщина вытеснения, u_∞ — скорость на внешней границе слоя, u — местная скорость в пограничном слое на расстоянии y по нормали от стенки.

В этом случае, как видно из фиг. 4, происходит некоторое почти



Фиг. 1



Фиг. 2

параллельное смещение прямой $U = f(\eta)$, что указывает на изменение постоянной C в выражении (1) с ростом внешней турбулентности. Обычно считается, что значение C в общем случае должно зависеть от отношения v_* / u_∞ .

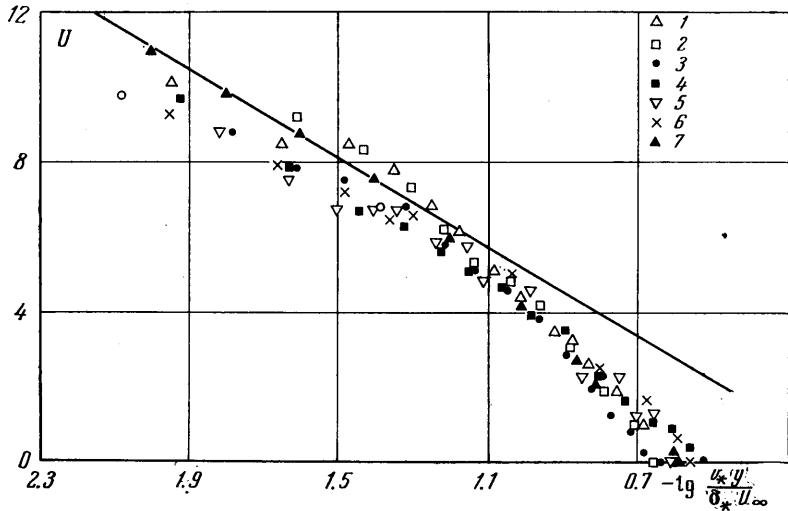
Однако систематическое влияние этого параметра обнаружить не удалось. К такому же выводу приходит и Ротта, анализируя данные Смитта и Уолкера [6].

Расчеты толщины вытеснения δ_* , толщины потери импульса θ и их отношения $H = \delta_* / \theta$ позволяют проследить влияние на них внешней турбулентности (см. табл. 2).

Как следует из рассмотрения таблицы, с ростом внешней турбулентности наполненность профиля скорости увеличивается.

Анализ результатов измерений вертикальных профилей продольной составляющей пульсационной скорости в общепринятой нормировке, например, $\sqrt{u'^2} / u_\infty = f(y / \delta)$, где δ — толщина пограничного слоя, хотя и указывает на сильное влияние внешней турбулентности (см. фиг. 2),

однако не позволяет найти какие-либо универсальные зависимости. Поэтому были введены понятия толщины вытеснения δ'_* и толщины потери



Фиг. 3

импульса θ' пульсационной составляющей скорости $v = \sqrt{u'^2}$

$$\delta_*' = \int_0^{\infty} V dy \quad (V = (v - v_{\infty}) / (v_m - v_{\infty}))$$

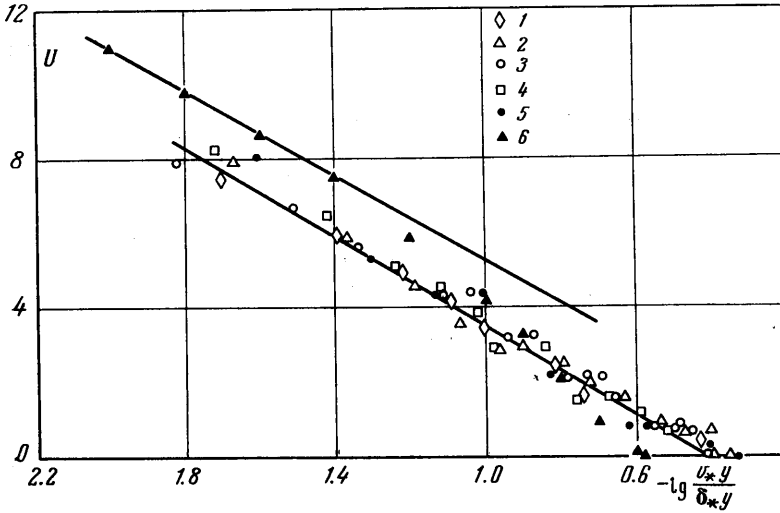
$$\theta' = \int_0^{\infty} V v / v_m dy, \quad H' = \delta_*' / \theta'$$

Здесь v_{∞} — значение пульсационной составляющей скорости на верхней границе, а v_m — максимальное значение пульсационной составляющей, H' — формпараметр.

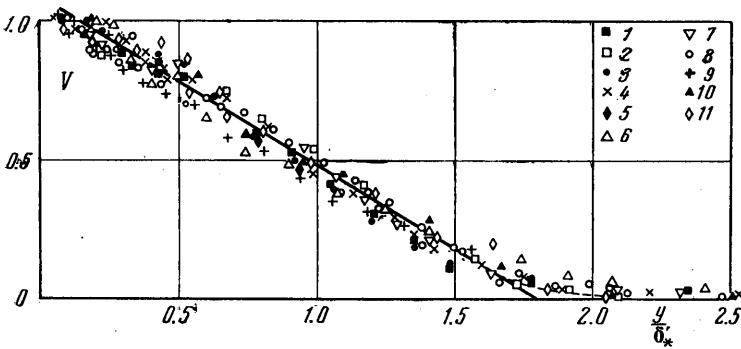
Таблица 1

№	K	Re	$h_0, \text{мк}$	v_*/u_{∞}	Примечание
1	0.003	$3.05 \cdot 10^6$	20	0.028	фиг. 3
2	0.004	$5.48 \cdot 10^6$	20	0.023	
3	0.004	$3.26 \cdot 10^6$	300	0.030	
4	0.004	$6.16 \cdot 10^6$	300	0.040	
5	0.004	$3.05 \cdot 10^6$	400	0.038	
6	0.004	$6.42 \cdot 10^6$	400	0.046	
7	по данным [5]				
1	0.035	$2.71 \cdot 10^6$	20	0.035	фиг. 4
2	0.036	$3.8 \cdot 10^6$	20	0.028	
3	0.036	$3.28 \cdot 10^6$	3000	0.035	
4	0.040	$4.76 \cdot 10^6$	300	0.040	
5	0.028	$2.36 \cdot 10^6$	400	0.032	
6	по данным [5]				

Величины δ_*' и θ' являются достаточно объективными характеристиками пограничного слоя и слабо зависят от точности измерений на верхней границе слоя, так как при $\nu \rightarrow \nu_\infty$ интеграл стремится к нулю.



Фиг. 4



Фиг. 5

Вертикальные профили пульсационной составляющей при различных внешних условиях, построенные в координатах $V, y/\delta_*'$ показаны на фиг. 5 для следующих случаев:

	K	R_δ	$h_0, \text{мк}$
1	0.003	$3.05 \cdot 10^6$	20
2	0.004	$5.48 \cdot 10^6$	20
3	0.019	$3.4 \cdot 10^6$	20
4	0.019	$4.93 \cdot 10^6$	20
5	0.035	$3.43 \cdot 10^6$	20
6	0.036	$3.81 \cdot 10^6$	20
7	0.004	$3.05 \cdot 10^6$	400
8	0.018	$3.05 \cdot 10^6$	400
9	0.028	$2.36 \cdot 10^6$	400
10	0.060	$0.43 \cdot 10^6$	400
11	0.030	$1.27 \cdot 10^6$	400

Уравнение прямой, проходящей через опытные точки, имеет вид

$$V = 1.09 - 0.6 y / \delta'_*$$

Как видно из этой фигуры такое представление указывает на универсальную зависимость энергии турбулентности от расстояния до стенки. Эту зависимость по аналогии с законом дефекта средней скорости можно

Таблица 2

K	δ_0 , мм	θ , мм	H	Примечание
0.004	6.7	5.4	1.24	Для расстояния от начала пластины 3450 мм
0.04	3.4	3.0	1.13	Средние для всех трех типов шероховатостей

назвать законом дефекта пульсационной составляющей скорости. Наличие такой универсальной зависимости экспериментально подтверждает распространение общего принципа подобия по числу Рейнольдса в случае развитой турбулентности на статистические характеристики. Заметим, что такое распространение на статистические характеристики пограничного слоя (средне-квадратичные значения пульсационной составляющей скорости) возможно при надлежащем учете внешней турбулентности.

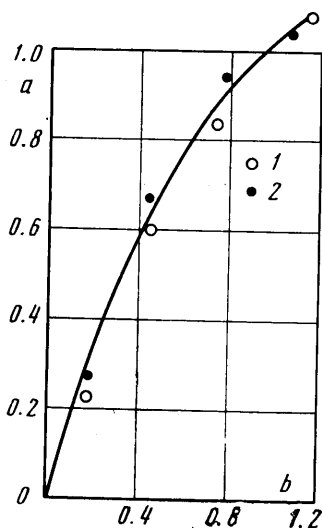
Интересно отметить, что величина V линейно убывает с высотой в отличие от логарифмической зависимости для закона средней скорости.

Некоторое отклонение от линейности на верхней и нижней границах пограничного слоя, возможно, связано не только с некоторыми качественными особенностями в этих областях, но и с относительно большими ошибками в измерении как v , так и y в этих частях пограничного слоя. Эти обстоятельства должны быть уточнены дальнейшими опытами. Величина формпараметра H' , как показывают данные эксперимента, так же как и в случае средней скорости, уменьшается с ростом внешней турбулентности.

Полученная универсальная зависимость пульсационной составляющей скорости по высоте позволяет рассчитать $v = f(y)$ по известным внешним параметрам, которые легко определить экспериментально. Для этого необходимо из прямых опытов найти зависимость δ'_* и v_m от чисел Re , K и шероховатости h_0 в более широких пределах, чем это сделано в этой работе.

Можно, исходя из общих соображений, указать на существенную зависимость δ'_* от толщины пограничного слоя или от расстояния до начала пластины.

На фиг. 6 в качестве иллюстрации приведена зависимость $a = (\delta'_* / h_0) \cdot 10^{-2}$ от $b = (u_\infty x / v_m h_0) \cdot 10^{-6}$ для случая малой внешней турбулентности и шероховатой поверхности при скоростях $V = 12$ м/сек (точки 1) и 28 м/сек (точки 2).



Фиг. 6

На основании проведенных опытов можно указать на зависимость величины v_m от шероховатости подстилающей поверхности и местного числа Re. Так, при изменении шероховатости поверхности от $h_0 = 0.2 \cdot 10^{-4}$ до $4 \cdot 10^{-4}$ м в диапазоне чисел $K = 0.004 \div 0.04$ и $Re = 2 \div 6 \cdot 10^6$ отношение v_m / u_∞ изменяется в пределах $0.06 \div 0.08$.

При наличии указанных зависимостей v_m и δ'^* от внешних условий полученный экспериментально универсальный закон дефекта пульсационной скорости позволяет рассчитать профиль энергии турбулентности в неустановившемся пограничном слое при переменной внешней турбулентности.

Поступило 21 III 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Горлин С. М. Влияние начальной турбулентности на обтекание различных тел. Аннот. докл. на III Всес. съезде по теорет. и прикл. механ., М., Изд. АН СССР, 1968.
2. Зражевский Н. М., Клинго В. В. К моделированию атмосферных турбулентных движений над неоднородной подстилающей поверхностью. Тр. Главн. геофиз. обсерв. Л., Гидрометиздат, вып. № 254, 1971.
3. Горлин С. М., Зражевский И. М., Зиборова С. П. Исследование влияния неровностей земной поверхности на характеристики воздушного потока в аэродинамической трубе. «Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы», Л., «Гидрометиздат», 1971.
4. Аэродинамические трубы Института механики. Научн. тр. Ин-та механ. МГУ, 1971, № 14.
5. Ротта И. К. Турбулентный пограничный слой в несжимаемой жидкости. Л., «Судостроение», 1967.
6. Smith D. W., Walker J. H. Skin — friction measurement in incompressible flow. NASA, Report R-26, 1959.