

УДК 536.244

ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ НА КЛИНЕ И НАВЕТРЕННОЙ СТОРОНЕ ПРОФИЛЯ

А. П. Брыляков, Г. М. Жаркова, Б. Ю. Занин,
В. Н. Коврижина, Д. С. Сбоев

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Исследованы структура течения за проволочными сетками при низкой дозвуковой скорости потока и влияние сеток на структуру течения в пограничном слое. Показано, что формируемая сеткой неоднородность средней скорости не исчезает вплоть до удаления вниз по потоку от сетки на 925 калибров. Сочетание жидкокристаллической термометрии с термоанемометрическими измерениями позволило установить источник происхождения стационарных крупномасштабных продольных вихревых структур в пограничном слое на клине и крыле, а также определить их параметры.

Ключевые слова: сетки, крыло, клин, пограничный слой, термоанемометрия, жидкокристаллическая термография.

Введение. Для описания возмущений набегающего потока, обусловленных турбулентностью, используются ее энергетические, спектральные и масштабные характеристики [1, 2]. В большинстве работ изучается влияние уровня турбулентности на структуру течения, тогда как роль, например, неоднородностей скорости набегающего потока или макромасштаба турбулентности изучена недостаточно [2–9]. На практике изолированное влияние повышенного уровня турбулентности наблюдается редко, поэтому часто исследуются комбинированные эффекты. Так, для заданного уровня турбулентности можно с помощью генераторов турбулентности реализовать суперпозицию хорошо контролируемого распределения средней скорости. Для создания контролируемого распределения средней скорости набегающего потока или продольной завихренности используются сетки, перфорированные экраны, крылышки и т. д.

Настоящая работа продолжает исследование влияния возмущений, генерируемых проволочными сетками, на структуру течения в пограничном слое профиля и в канале с сужением [10]. Хотя сетки используются в успокоительных камерах аэродинамических труб для того, чтобы уменьшить неоднородности потока и демпфировать “приходящую” турбулентность, они могут вносить собственные неоднородности в поток. Получение достоверной информации о параметрах внутренней структуры турбулентности набегающего потока может способствовать развитию представлений о доминирующих механизмах в тех или иных течениях. В настоящей работе исследуются эффекты умеренно повышенных уровней турбулентности ($Tu \approx 1\%$), характерных, в частности, и для течений за сетками. Эта проблема вызывает интерес в связи с разработкой методов управления дозвуковыми течениями, решением задач теории переноса в турбулизированных потоках, контроля и улучшения качества потока в аэродинамических трубах и т. д.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 01-01-00828, 04-01-00154) и в рамках Интеграционного проекта № 25 СО РАН.

Таблица 1

Характеристики используемых сеток и режимов

Номер сетки	M , мм	d , мм	Tu , % ($x = 350$ мм)	Re_d ($U = 6$ м/с)
1	1	0,25	0,7	224
2	2	0,4	1	320
3	5,5	1,2	1,8	576

Примечание. M — размер ячейки, d — диаметр проволоки.

Эффекты неоднородности распределения скорости набегающего потока наиболее изучены для течения вблизи пластины, где они проявляют себя в виде полосчатой структуры, аналогичной наблюдаемой при повышенной степени турбулентности набегающего потока [8]. В отличие от обтекания пластин, где полосчатые структуры соизмеримы с толщиной пограничного слоя и являются нестационарными, в течении Хименца, вблизи точки торможения на круговом цилиндре влияние неоднородности распределения скорости набегающего потока проявляется в виде стационарных крупномасштабных продольных структур с относительной длиной волны $\lambda/\delta \gg 1$. Чтобы объяснить происхождение этих структур, в [9] была предложена математическая модель для исследования механизма усиления завихренности, обусловленного растяжением продольных вихрей в дивергентном течении в области торможения потока. Авторами работы [9] показано, что картина течения, наблюдаемая на круговом цилиндре, напрямую связана с неоднородностью набегающего потока и не является результатом неустойчивости пограничного слоя в точке торможения потока.

Цель настоящей работы — экспериментальное изучение общих закономерностей обтекания клина и криволинейного профиля (некругового цилиндра) при комбинированном воздействии повышенного уровня турбулентности и малой неоднородности скорости набегающего потока, а также уточнение механизмов влияния этих факторов. Чтобы ограничиться безотрывным течением, рассматривается течение только на наветренной стороне профиля при углах атаки $\alpha = 0 \div 27^\circ$.

1. Условия экспериментов и методы исследования. 1.1. *Экспериментальные установки и модели.* Первая серия экспериментов проводилась в дозвуковой аэродинамической трубе МТ-324 Института теоретической и прикладной механики (ИТПМ) СО РАН с рабочей частью размерами $200 \times 200 \times 700$ мм. Степень турбулентности свободного потока в закрытой рабочей части установки составляла $Tu = u'/U_\infty = 0,1$ %. Для ее увеличения использовались проволочные сетки. Параметры используемых сеток приведены в табл. 1. Для проведения экспериментов была выбрана широко распространенная в различных технических устройствах конфигурация, моделирующая конфузور — клиновидный выступ с острой передней кромкой, изготовленный из дерева, шириной, равной ширине рабочей части (рис. 1). В продольном сечении выступ имел форму трапеции с длиной основания $L = 168$ мм, высотой $h = 50$ мм и углами наклона боковых граней 30 и 45° (передняя и задняя кромки). Эксперименты выполнялись при числах Рейнольдса, вычисленных по высоте клина, $Re_h = 1,3 \cdot 10^4$ и $2 \cdot 10^4$ (по длине основания $Re_L = 4,48 \cdot 10^4$ и $6,72 \cdot 10^4$).

Вторая серия экспериментов проводилась в дозвуковой аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ, характеризующейся более высоким качеством потока, в частности большей стабильностью средней скорости набегающего потока во времени и начальным уровнем турбулентности $Tu = 0,04$ %. Размеры рабочей части установки $1000 \times 1000 \times 4000$ мм. Для увеличения степени турбулентности использовалась сетка с размерами ячеек 2×2 мм,

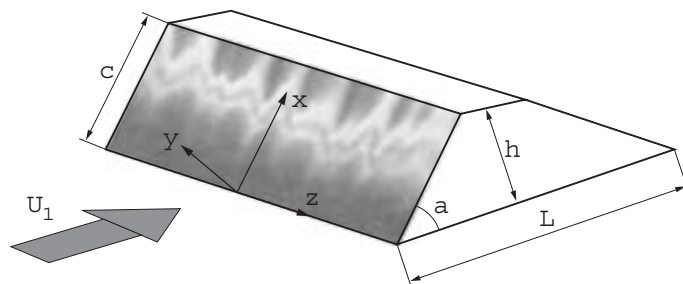


Рис. 1. Схема клина и фрагмент ЖК-визуализации поля температур (поперечный размер картины визуализации 120 мм; сетка № 2, $U_\infty = 6$ м/с; $\alpha = 45^\circ$; расстояние до сетки $x_1/M = 175$)

идентичная сетке № 2 (см. табл. 1). Исследовалось течение вблизи наветренной поверхности прямого крыла малого удлинения. Модель крыла симметричного профиля с хордой крыла $c = 228$ мм, размахом 311 мм и относительной толщиной 15 % была изготовлена из дерева. Чтобы предотвратить поперечное растекание потока использовались концевые шайбы. Эксперименты выполнялись при числе Рейнольдса, вычисленном по хорде крыла, $Re_c = 1,76 \cdot 10^5$.

1.2. *Метод жидкокристаллической термографии (ЖКТ)*. Для панорамной визуализации и измерения полей температур использовались пленочные ЖК-индикаторы [11]. Благодаря малой толщине пленок (около 25 мкм) наличие термоиндикатора не сказывается на изучаемом поле температур. Процесс измерения температуры заключался в определении для каждой точки поверхности цветовых координат в пространстве цветов HSI и последующей оцифровке с использованием тарировочной зависимости температуры от цветового тона. Подробное описание метода приведено в работе [12].

В экспериментах использовались ЖК-покрытия с шириной области селективного отражения 3°C и граничные условия второго рода (постоянная плотность теплового потока на поверхности модели). Неоднородность теплового потока контролировалась по цвету ЖК-покрытия в экспериментах без потока и не превышала 10 % по краям модели.

1.3. *Термоанемометрия*. В ходе эксперимента средняя (U) и пульсационная (u') составляющие продольной компоненты скорости измерялись термоанемометром постоянной температуры с одноточечным датчиком. Электрические сигналы измерялись с помощью моста термоанемометра типа 55M01 фирмы DISA. Через субтрактор (блок смещения постоянного напряжения для расширения динамического диапазона) и аналого-цифровой преобразователь типа MacADIOS-Adio фирмы "GW Instruments" они поступали в цифровом виде в персональный компьютер Macintosh Classic II фирмы "Apple Computers" для дальнейшей обработки. Длина вольфрамовой нити датчика термоанемометра 1 мм, диаметр 6 мкм. Тарировка проводилась в свободном потоке вблизи трубки Пито — Прандтля при скоростях потока в диапазоне $2 \div 12$ м/с для установки МТ-324 и $2 \div 20$ м/с для трубы Т-324. Погрешность определения средней скорости не превышала 3 % при измерении в пограничном слое на клине ($U = 2 \div 3$ м/с) и 1 % при измерении в свободном потоке в трубе Т-324 при $U \approx 12$ м/с.

2. Результаты экспериментов. 2.1. Структура пристенного течения на клине.

В первой серии экспериментов исследовалась структура пограничного слоя на клине. Визуализация дымом показала, что на клине реализуется течение с линией растекания. Из результатов ЖК-визуализации поля температур следует, что после установки на выходе сопла сетки в пограничном слое на клине возникают стационарные продольные структуры, которые проявляются в виде полос повышенной и пониженной температуры поверх-

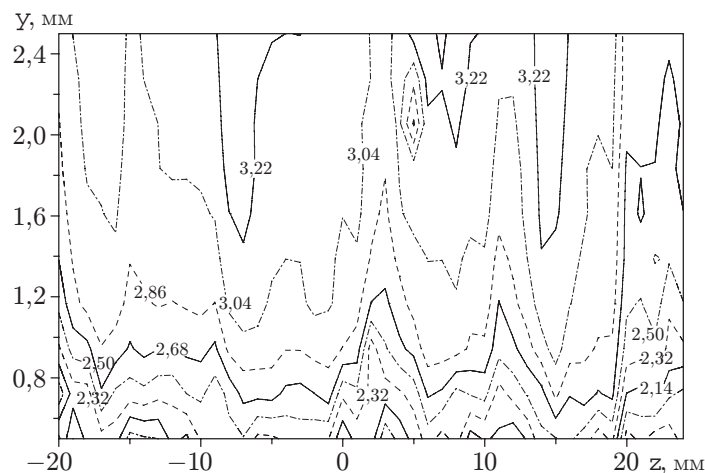


Рис. 2. Изолинии средней скорости (м/с) в плоскости (yz) в сечении $x/c = 0,42$ при $x_1/M = 175$

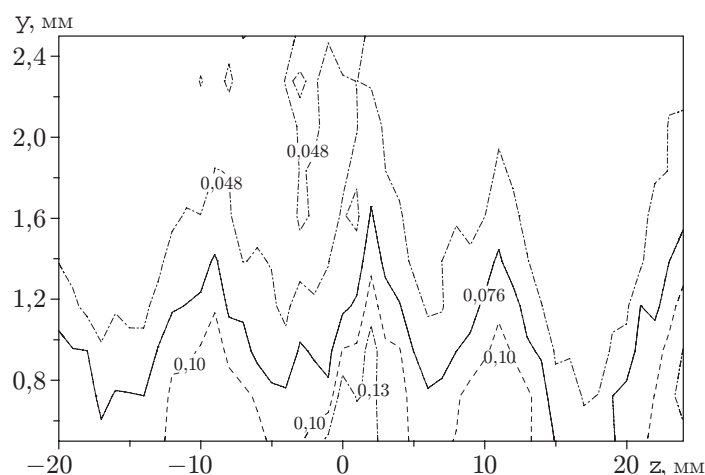


Рис. 3. Изолинии пульсаций продольной компоненты скорости u' в плоскости (yz) в сечении $x/c = 0,42$ при $x_1/M = 175$

ности с некоторым характерным поперечным масштабом (см. рис. 1). Расположение и размер этих структур не зависят от продолжительности эксперимента и воспроизводятся при повторных испытаниях.

Чтобы выяснить, насколько точно ЖК-визуализация отражает реальную структуру пограничного слоя, были проведены термоанемометрические измерения с сеткой № 2 ($U_\infty = 6$ м/с, $\alpha = 45^\circ$, $x_l/M = 175$). Измерения в пограничном слое на клине показали, что в направлении размаха средняя продольная скорость промодулирована с амплитудой, достигающей 20 % местной скорости. Аналогичная модуляция наблюдается и для среднеквадратичных пульсаций продольной компоненты скорости в пограничном слое, причем максимумам температур соответствуют области низких пульсаций скорости, а минимумам — высоким. Толщина вытеснения также зависит от поперечной координаты и больше во впадине. На рис. 2, 3 приведены изолинии средней скорости и пульсаций в плоскости yz в сечении $x/c = 0,42$ (c — длина боковой грани клина), которые показывают наличие в области измерения четырех пиков и впадин. Данные измерения позволяют сделать предположение о структуре пограничного слоя как о системе вращающихся в противо-

ложных направлениях вихрей с поперечными размерами, в несколько раз превышающими толщину пограничного слоя. Процесс формирования таких вихрей вблизи линии торможения, находящихся за пределами ламинарного пограничного слоя, исследовался, например, в [13].

2.2. *Влияние геометрии эксперимента и скорости набегающего потока на структуру пристенного течения на клине.* Для выяснения закономерностей, определяющих поперечный масштаб продольных структур, при неизменном положении сетки № 2 была выполнена ЖК-термометрия при двух углах клина $\alpha = 30^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$ и скоростях $U_\infty = 4$ и 6 м/с. Установлено, что при всех исследованных параметрах количество полос на картинах визуализации, а также координаты пиков и впадин температуры на графиках совпадают. Такой же результат получается при увеличении расстояния от сетки до передней кромки модели от $x_l/M = 175$ до 213 . Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) поперечного распределения температур показывает, что с точностью до минимального частотного разрешения ДПФ максимумы при всех исследованных значениях угла клина, скорости набегающего потока и расстояния от сетки до передней кромки соответствуют длине волны $\lambda = (17 \pm 2,4)$ мм.

ЖК-визуализация и графики ДПФ температурных кривых с использованием трех разных сеток показали, что для сеток № 1 и № 2 поперечная длина волны продольных структур с точностью до минимального разрешения равна (17 ± 2) мм, а для сетки № 3 значительно больше и составляет (37 ± 12) мм.

Сравнение показало хорошее соответствие результатов ЖКТ и термоанемометрии: совпадают масштабы структур, областям с высокой средней скоростью соответствуют области с низкой температурой, и наоборот. Кроме того, установлено, что методический перегрев поверхности на $10\text{--}15^\circ\text{C}$ не влияет на поперечный масштаб структур.

По результатам экспериментов можно предположить, что решающую роль в формировании пространственных структур в данном течении играет структура набегающих возмущений, генерируемых сеткой.

3. Структура течения за турбулизирующей сеткой в отсутствие модели. Для выяснения физического механизма, ответственного за возникновение продольных структур, в аэродинамической трубе Т-324 было проведено исследование параметров потока за турбулизирующей сеткой, которая по размерам ячеек и диаметру проволоки соответствовала сетке № 2, используемой ранее. Измерения средней скорости проводились без модели при перемещении датчика в пространстве вдоль линии, соответствующей положению передней кромки модели. Оказалось, что средняя скорость и среднеквадратичные пульсации непостоянны вдоль координаты z . Наблюдается чередование областей повышенной и пониженной средней скорости потока. Максимальный разброс средней скорости (ΔU_{\max}) и средний по сечению уровень пульсаций скорости (\bar{u}') приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что даже на расстоянии за сеткой $x_l/M = 925$ поток не является однородным.

Эволюцию поперечного масштаба продольных структур в свободном потоке при увеличении расстояния от сетки до датчика легко проследить на графиках пространствен-

Таблица 2

Характеристики потока за сеткой № 2 ($U = 12$ м/с)

x , мм	x/M	$\Delta U_{\max}/U$, %	\bar{u}' , %
350	175	8	0,89
850	425	7,1	0,60
1850	925	5,7	0,53

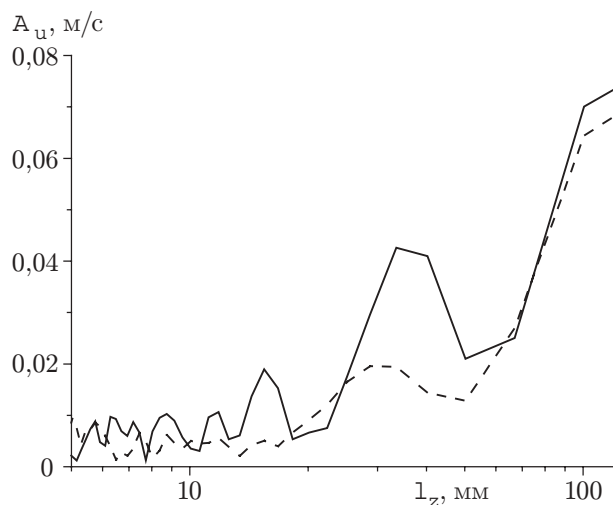


Рис. 4

Рис. 4. Дискретное преобразование Фурье средней продольной скорости в свободном потоке за сеткой:

штриховая кривая — $x_1/M = 175$; сплошная кривая — $x_1/M = 925$

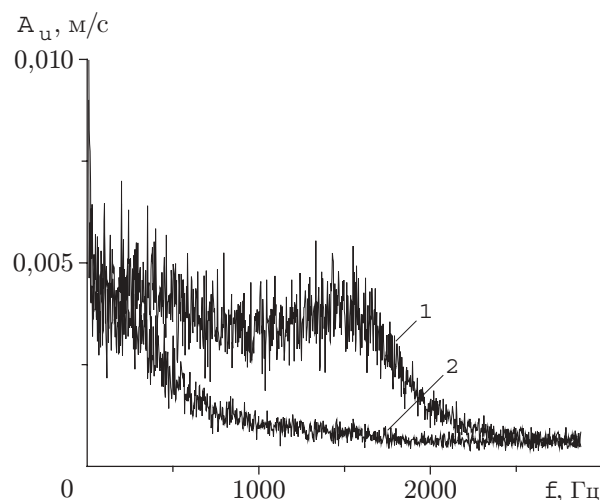


Рис. 5

Рис. 5. Спектры пульсаций продольной компоненты скорости в свободном потоке за сеткой:

1 — $x_1/M = 175$; 2 — $x_1/M = 925$

ного фурье-преобразования средней скорости при $x_l/M = 175$ и 925 (рис. 4). Видно, что с увеличением расстояния амплитуды второй гармоники возмущений (скорости A_u и температуры A_T) сильно уменьшаются. Характер спектра пульсаций продольной компоненты скорости также изменяется (рис. 5) в сторону уменьшения амплитуды высокочастотных составляющих.

4. Структура течения вблизи наветренной стороны крыла. ЖК-визуализация показала, что без сетки, как и в случае с клином, в пограничном слое крыла продольные структуры не наблюдаются. После установки сетки на расстоянии 175–925 калибров от передней кромки модели структуры появляются. Характерный поперечный размер структур в этом случае оказывается около 18 мм, что хорошо соответствует масштабу структур на клине (17 мм), при использовании сетки № 2.

4.1. *Влияние расстояния от сетки до передней кромки модели ($\alpha = 27^\circ$).* Сравнение графиков ДПФ поперечного распределения скорости и температуры на поверхности модели при одинаковом расстоянии от сетки до датчика и от сетки до передней кромки показало (рис. 6), что на расстоянии от сетки 175 калибров и в потоке, и на модели присутствуют два пространственных масштаба, соответствующие двум наибольшим пикам спектральной плотности мощности. Первый пик ($\lambda_z = (44 \pm 14)$ мм) соответствует периоду наблюдаемой модуляции средней скорости, а второй ($\lambda_z = (17 \pm 2,4)$ мм) — зарегистрированным методом ЖК-визуализации продольным структурам. Высокое значение амплитуды при частотах, близких к нулю, вызвано, по-видимому, тем, что профиль средней скорости имеет некоторый наклон, что при выполнении ДПФ приводит к появлению низкочастотных составляющих. При увеличении расстояния от сетки до передней кромки до $x_l/M = 925$ мелкомасштабные структуры ($\lambda_z = 17$ мм) исчезают, а крупномасштабные ($\lambda_z = 44$ мм) остаются.

Соответствие пространственной структуры пограничного слоя пространственной структуре набегающих возмущений, генерируемых сеткой, по-видимому, свидетельству-

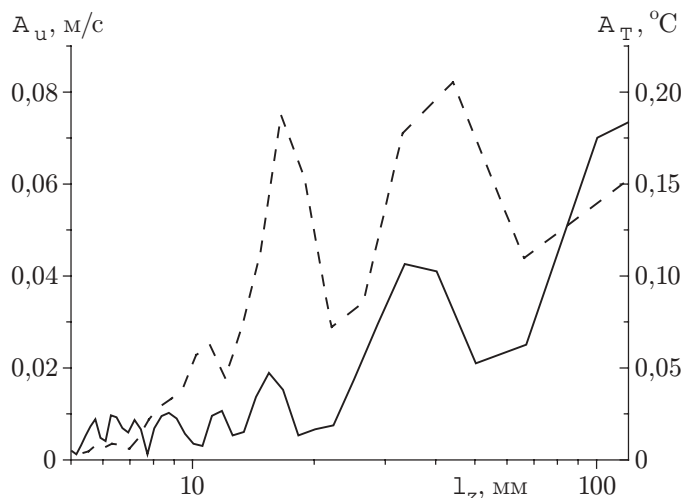


Рис. 6. Дискретное преобразование Фурье поперечного распределения скорости (сплошная кривая) и температуры (штриховая кривая) на поверхности модели ($x_1/M = 175$)

ет в пользу механизма растяжения завихренности как ответственного за возникновение продольных структур. Аналогичное явление наблюдается также и при угле атаки крыла $\alpha = 0$. Этот случай из всей проведенной серии экспериментов наиболее близок к обтеканию цилиндра, рассмотренному в работе [14], где изучалось образование продольных вихрей вблизи передней кромки затупленного тела посредством растяжения завихренности стационарных неоднородностей набегающего потока.

При изменении угла атаки не наблюдается значительного изменения поперечной длины волны, хотя на графиках ДПФ температуры, соответствующих различным углам атаки, наблюдается смещение пика, соответствующего длине волны продольных структур, на величину минимального частотного разрешения ДПФ.

Таким образом, обтекаемые тела, рассматриваемые в данной работе, по-видимому, не генерируют неустойчивости вблизи линии растекания, а лишь проявляют пространственную структуру возмущений, приходящих из внешнего потока.

Заключение. В работе представлены результаты исследования структуры пристенных течений, возникающих на наветренной поверхности крыла и клине при комбинированном воздействии повышенного уровня турбулентности и поперечного градиента скорости набегающего потока, индуцированных проволочными сетками.

Установлено, что в пограничном слое на клине в трубе МТ-324 влияние возмущений набегающего потока проявляется в виде системы стационарных продольных структур с характерными поперечными размерами λ , в несколько раз превышающими толщину пограничного слоя δ . Расположение этих структур и величина λ определяются сеткой. Изменение угла раскрытия клина ($\alpha = 30, 45^\circ$), расстояния до сетки (175–213 калибров), скорости набегающего потока ($U_\infty = 4, 6$ м/с) не влияют на структуру течения. При этом незначительные модуляции средней скорости набегающего потока с амплитудой 1–2 % оказывают значительное влияние на структуру пограничного слоя: дефект скорости в пограничном слое на клине, обусловленный продольными структурами, достигает 20 %.

В аэродинамической трубе Т-324 исследована структура свободного потока за турбулизующей сеткой и в пограничном слое на наветренной поверхности крыла при числе Рейнольдса по хорде $1,76 \cdot 10^5$. Обнаружено наличие неравномерности в поперечном распределении средней скорости свободного потока и среднеквадратичных пульсаций за сеткой.

Определены их характеристики в зависимости от расстояния до сетки. С помощью метода ЖКТ и фурье-анализа показано хорошее соответствие между поперечными масштабами структур в пограничном слое на крыле и поперечными масштабами возмущений средней скорости набегающего потока, формируемыми сеткой. Хорошее соответствие между данными ЖК-термографии и термоанемометрии показывает эффективность использования жидкокристаллической визуализации при изучении пристенных течений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бредшоу П.** Введение в турбулентность и ее измерение. М.: Мир, 1974.
2. **Дыбан Е. П., Эпик Э. Я.** Тепломассообмен и гидродинамика турбулизированных потоков. Киев: Наук. думка, 1985.
3. **Böttcher J., Wedemeyer E.** The flow downstream of screens and its influence on the flow in the stagnation region of cylindrical bodies // *J. Fluid Mech.* 1989. V. 204. P. 501–522.
4. **Saric W. S., White E. B., Reed H. L.** Boundary-layer receptivity to free-stream disturbances and its role in transition. N. Y., 1999. (Paper / AIAA; N 99-3788).
5. **Westin K. J. A., Boiko A. V., Klingman B. G. V., et al.** Experiments in a boundary layer subject to free-stream turbulence. Pt 1: Boundary layer structure and receptivity // *J. Fluid Mech.* 1994. V. 281. P. 193–218.
6. **Rigby D. L., Van Fossen G. J.** Increased heat transfer to a cylindrical leading edge due to spanwise variation in the free-stream velocity. N. Y., 1991. (Paper / AIAA; N 91-1739).
7. **Van Fossen G. J., Ching Chang Y.** Measurements of the influence of integral length scale on stagnation region heat transfer // NASA TM-106503, 1994.
8. **Устинов М. В.** Восприимчивость пограничного слоя на плоской пластине с затупленной передней кромкой к стационарной неоднородности набегающего потока // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 4. С. 93–100.
9. **Sutera S. P., Maeder P. F., Kestin J.** On the sensitivity of heat transfer to free stream vorticity // *J. Fluid Mech.* 1963. V. 16. P. 497–520.
10. **Zharkova G. M., Zanin B. Yu., Kovrizhina V. N., Brylyakov A. P.** Free stream turbulence effect on the flow structure over the finite span straight wing // *J. of Visualization. Japan.* 2002. V. 2, N 5. P. 169–176.
11. **Жаркова Г. М., Сонин А. С.** Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: Наука, 1994.
12. **Жаркова Г. М., Коврижина В. Н., Хачатурян В. М.** Экспериментальное исследование дозвуковых течений методом жидкокристаллической термографии // ПМТФ. 2002. Т. 43, № 2. С. 122–128.
13. **Wilson S. D. R., Gladwell I.** The stability of a two-dimensional stagnation flow to three-dimensional disturbances // *J. Fluid Mech.* 1978. V. 84. P. 517–527.
14. **Sadeh W. Z., Sutera S. P., Maeder P. F.** Analysis of vorticity amplification in the flow approaching a two-dimensional stagnation point // *Z. Angew. Math. Phys.* 1970. V. 21. P. 669–716.

*Поступила в редакцию 24/VI 2003 г.,
в окончательном варианте — 23/IX 2003 г.*