

С. Н. Толкачев, В. С. Каприлевская, В. В. Козлов

*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская 4/1 Новосибирск, 630090, Россия*

*Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия*

kozlov@itam.nsc.ru, tolkachevst@gmail.com, red.fox3108@gmail.com

**РОЛЬ ДВУМЕРНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ
В ПРОЦЕССЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА
В ОБЛАСТИ БЛАГОПРИЯТНОГО ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ
НА СКОЛЬЗЯЩЕМ КРЫЛЕ ***

Исследовано развитие стационарных и вторичных возмущений при возбуждении трехмерной и двумерной шероховатостями. Показано, что двумерная шероховатость оказывает дестабилизирующее влияние на возмущения, индуцированные впереди стоящей трехмерной шероховатостью. При этом сама двумерная шероховатость способна приводить к появлению стационарных структур, а затем и вторичных возмущений, частотный диапазон которых лежит ниже, чем при возбуждении стационарных вихрей трехмерной шероховатостью.

Ключевые слова: ламинарно-турбулентный переход, скользящее крыло, шероховатость, неустойчивость поперечного течения, вторичная неустойчивость, метод жидкокристаллической термографии, трехмерный пограничный слой.

Введение

Полеты на трансзвуковых скоростях требуют применения стреловидных крыльев на летательных аппаратах. Однако такое крыло по сравнению с прямым обладает дополнительным механизмом неустойчивости из-за наличия вторичного течения, что приводит к ламинарно-турбулентному переходу в области благоприятного градиента давления.

Современные производители самолетов ведут интенсивные разработки ламинаризованного самолета, что в перспективе может обеспечить снижение расхода топлива на 15 %. Однако на этом пути большое количество проблем, так как даже микронного раз-

мера шероховатости способны вызвать локальный в поперечном направлении ламинарно-турбулентный переход, а в реальности линия перехода становится зигзагообразной.

Механизм ламинарно-турбулентного перехода, вызванный шероховатостями, изучался в работах [1–3]. В работах [1; 2] исследования проводились в области нейтрального градиента давления. Показано, что край шероховатости вызывает появление одиночного вихря (продольной структуры), который приводит к появлению двух мод вторичных возмущений, что, в конечном счете, приводит к ламинарно-турбулентному переходу [1]. Было показано, что при взаимодействии двух противоработающих

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ НШ_2924.2041.1 и частично проектов РФФИ (гранты № 11-01-00292, 12-08-31083, 12-07-00548, 13-07-00616, 15-08-01945).

щихся вихрей устойчивость пограничного слоя может быть выше [2], чем в случае изолированных вихрей. Обнаружено появление дополнительных стационарных вихрей в результате нелинейного развития вторичных возмущений. В [3] были выполнены исследования с использованием регулярных микронных шероховатостей. В зависимости от шага шероховатости возникало преобладание одной из двух высокочастотных мод (трансверсальной и нормальной) [3]. Однако остался вопрос, почему в эксперименте не удалось возбудить акустикой моды вторичных возмущений.

В работе [4] показано, что сценарий ламинарно-турбулентного перехода зависит от скорости набегающего потока. Вторичные возмущения в естественных условиях имеют вид волнового пакета. При малых скоростях сценарий нелинейного развития реализуется с заполнением низкочастотной составляющей спектра. Увеличение скорости набегающего потока приводит к увеличению амплитуды волнового пакета до 1 % от скорости набегающего потока, после чего появляются гармоники волнового пакета с последующим заполнением спектра до турбулентного состояния.

Конструкция современного крыла с его механизацией весьма сложная. Можно выделить дву- и трехмерные шероховатости. Самым показательным примером двумерной шероховатости является стык предкрылка. Примеров трехмерных шероховатостей гораздо больше: естественная шероховатость поверхности, заклепки, вихреобразователи, насекомые, разбивающиеся о переднюю кромку при взлете, снег и др.

В работе делается акцент на исследовании отдельно двумерной шероховатости,

а также ее влияния на развитие стационарного вихря, возбужденного цилиндрической шероховатостью.

Методики

Условия измерений. Эксперимент (рис. 1) проводился в рабочей части малотурбулентной аэродинамической трубы АТ-324 размером $1000 \times 1000 \times 4000$ мм. Скорость набегающего потока контролировалась насадком Пито – Прандтля, соединенного с электронным манометром, $V_\infty = 10,9$ м/с. Температура воздуха составляла 296°K .

Уровень шума работающей аэродинамической трубы измерялся шумомером с ветрозащитной насадкой в форкамере перед конфузуром за поворотными лопатками до детурбулизирующих сеток (50,7 ДБА) и после детурбулизирующих сеток (47,9 ДБА). Степень поджатия потока в установке 17,5 поэтому скорость потока при измерении шума составляла около 0,68 м/с. При этом согласно инструкции при использовании ветрозащитного кожуха разрешается измерять уровень шума при скоростях ветра до 5 м/с.

Модель крыла. Для исследований была выбрана модель скользящего крыла, профиль которой образован цилиндром радиусом $r = 40$ мм и двумя сходящимися плоскостями. Хорда крыла составляет $C_h = 400$ мм. Угол скольжения $\chi = 45^\circ$.

Угол атаки выбирался таким образом, чтобы реализовать благоприятный градиент давления над плоской частью профиля крыла и составлял $\alpha = -12,3^\circ$. На модели крыла были установлены концевые шайбы, чтобы отсечь возмущения, развивающиеся на стенках рабочей части. В самой нижней части модели крыла установлены турбулизаторы для предотвращения отрыва.

Жидкокристаллическая термография. Исследование пристенной структуры течения проводилось методом жидкокристаллической термографии, которая в подробностях описана в работе [5; 6]. При этом для работы методики осуществлялся подогрев жидкокристаллической пленки до рабочего интервала температур, который составлял от 303 до 306°K . Визуализацию было решено представить в цветовых координатах.

Термоанемометрические измерения. В качестве измерительной методики была выбрана термоанемометрия постоянного сопротивления (рис. 2).

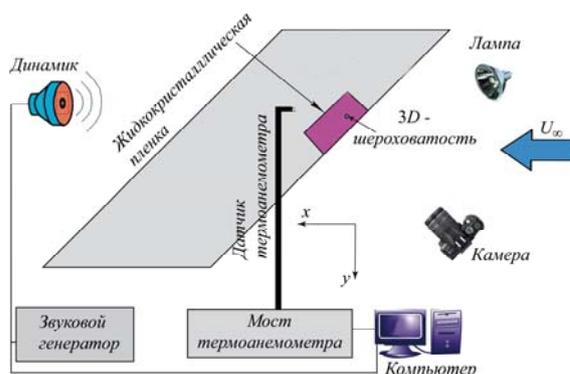


Рис. 1. Схема эксперимента

Перед измерениями нить датчика термоанемометра была установлена параллельно поверхности модели скользящего крыла и перпендикулярно скорости набегающего потока.

Тарировка датчика проводилась рядом с насадком Пито – Прандтля в скоростном диапазоне от 0 до 16 м/с.

Введение стационарных возмущений. Возбуждение стационарных возмущений осуществлялось трехмерной цилиндрической шероховатостью высотой 0,8 мм и диаметром 1,6 мм.

В экспериментах с использованием жидкокристаллической термографии с ориентацией на работы [4], выполненные ранее на этой модели крыла, цилиндрическая шероховатость была расположена в $64,2^\circ$ от линии симметрии профиля крыла для реализации эффективного возбуждения стационарных и вторичных возмущений. Также исследовалось влияние двумерной шероховатости толщиной 0,13 мм, шириной 15 мм и длиной 200 мм. Высота двумерной шероховатости могла варьироваться от 0 до 1,6 мм за счет набора таких шероховатостей.

Для термоанемометрических исследований была выбрана двумерная шероховатость шириной 15 мм, длиной 118 мм, высотой 0,91 мм. Цилиндрическая шероховатость была помещена в $63,1^\circ$ от линии симметрии профиля крыла.

Возбуждение вторичных возмущений осуществлялось динамиком громкоговорителя, соединенного с генератором звуковых синусоидальных сигналов.

В первой серии экспериментов методика жидкокристаллической термографии не позволяла количественно сравнивать акустическое воздействие на среднее течение. Были проведены исследования в частотном диапазоне от 100 до 3 000 Гц с шагом в 100 Гц. Для презентации результатов было решено выделить режимы 500 и 1 800 Гц.

Во второй серии экспериментов термоанемометрические измерения за двумерной шероховатостью показали, что естественные возмущения имеют вид волнового пакета с максимумом вблизи 700 Гц, поэтому для дальнейших исследований процесса развития вторичных возмущений была выбрана эта частота.

Предварительные термоанемометрические измерения позволили выбрать два режима акустического воздействия с разной

амплитудой. Измерения шумомером в рабочей части трубы без потока показали: режим малого акустического воздействия 50,1 ДБА, режим сильного акустического воздействия 65 ДБА при частоте 700 Гц.

Система координат. В работе используется следующая система координат:

ось X направлена вдоль по потоку;

ось Y перпендикулярна оси X, при этом ось цилиндрической части профиля крыла лежит в плоскости XY;

ось Z перпендикулярна осям X и Y;

ось X_w параллельна оси X, но имеет значение 0 над линией перехода цилиндрической части профиля на плоскую.

Таким образом, система координат X_w –Y является косоугольной, что облегчает интерпретацию данных при исследовании скользящего крыла.

Результаты измерений

Жидкокристаллическая термография. После установки угла атаки необходимо было убедиться в том, что над крылом реализуется благоприятный градиент давления.

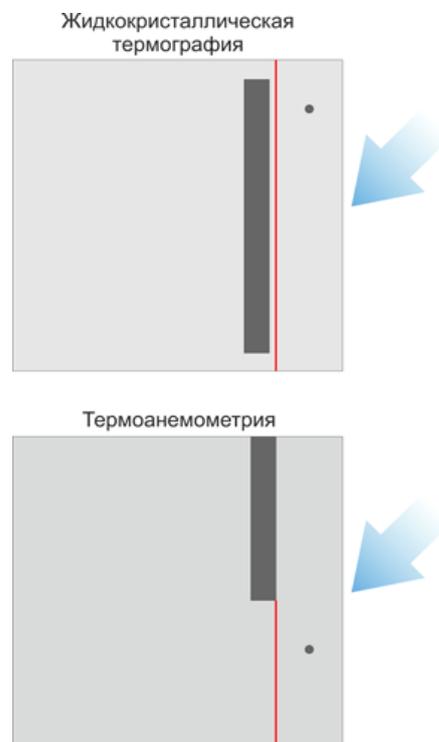


Рис. 2. Схема расположения двумерной и цилиндрической шероховатостей на модели крыла. Красной линией показана линия перехода цилиндрической части профиля на плоскую

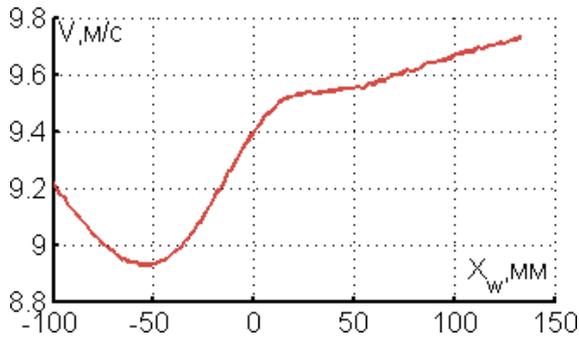


Рис. 3. Распределение скорости на расстоянии 20 мм от поверхности модели

Для этого были проведены термоанемометрические измерения над моделью крыла на расстоянии 20 мм от поверхности (рис. 3).

На плоской части модели крыла наклеивалась двумерная шероховатость слоями по 0.13 мм толщиной.

На рис. 4 представлены результаты визуализации методом жидкокристаллической термографии для различной толщины двумерной шероховатости h_{2d} .

За цилиндрической шероховатостью формируется пара противовращающихся вихрей, один из которых очень быстро затухает, а амплитуда второго достигает своего насыщения (рис. 4, а). Наклеивание двумерной шероховатости до высоты 0,26 мм на визуализации не приводит к изменению течения (рис. 4, б). Дальнейшее увеличение высоты двумерной шероховатости приводит к появлению дополнительных стационарных вихрей (рис. 4, в), усилению пульсаций (рис. 4, г) и к турбулизации течения в следе за цилиндрической шероховатостью (рис. 4, д, е).

Замечено, что за двумерной шероховатостью высотой больше 0,91 мм формируются продольные структуры (рис. 5, б). При этом длина волны менялась вместе с изменением высоты двумерной шероховатости (рис. 5, б, в).

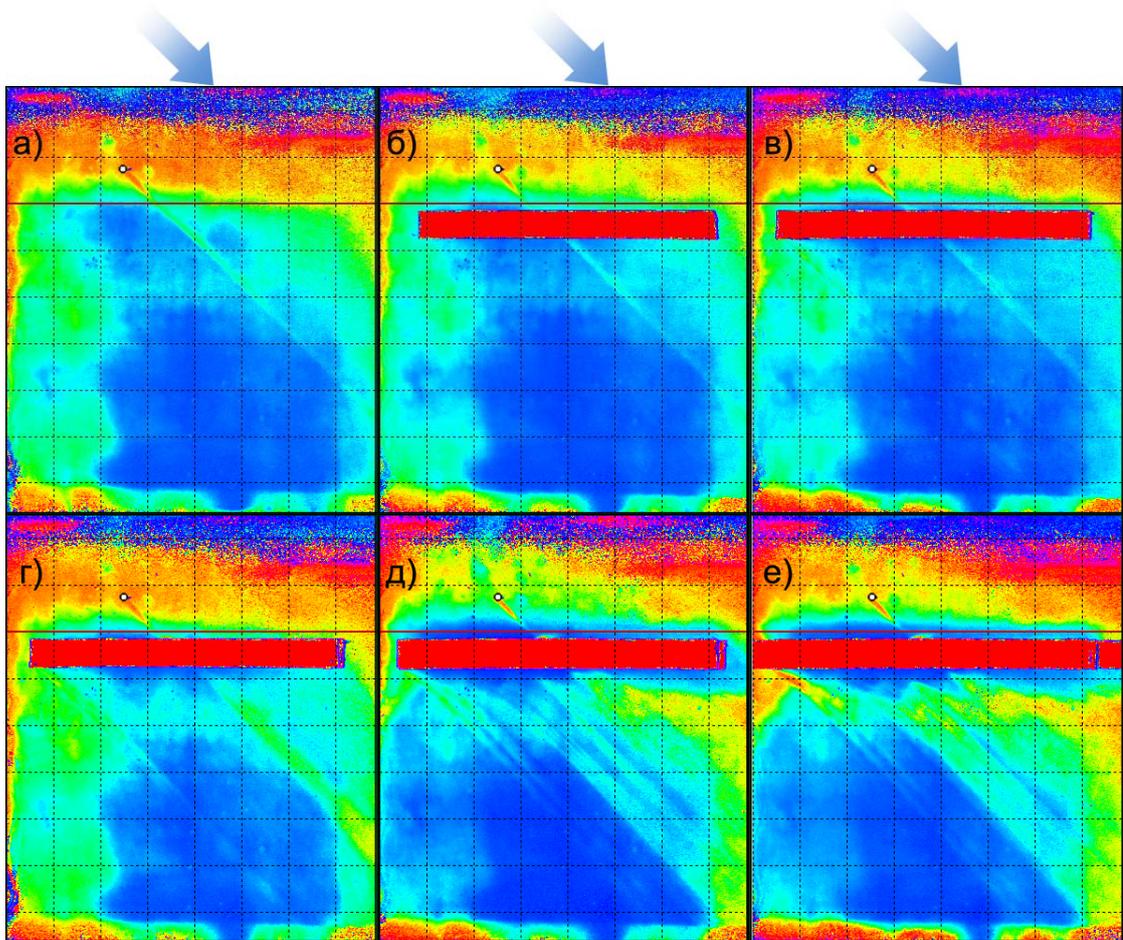


Рис. 4. Влияние высоты двумерной шероховатости h_{2d} на след за цилиндрической шероховатостью: а – $h_{2d} = 0$ мм; б – $h_{2d} = 0,26$ мм; в – $h_{2d} = 0,52$ мм; г – $h_{2d} = 0,78$ мм; д – $h_{2d} = 1,56$ мм; е – $h_{2d} = 1,82$ мм

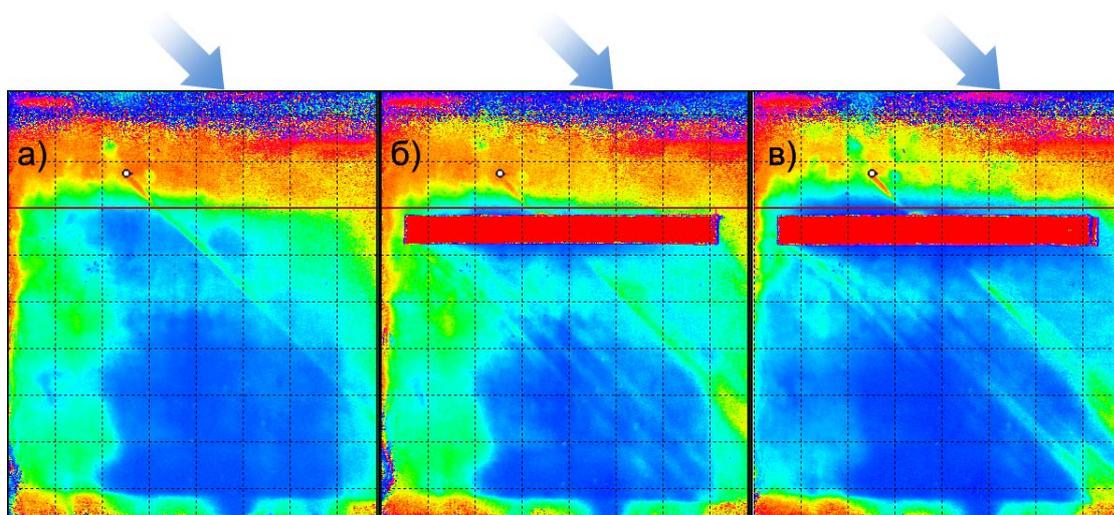


Рис. 5. Влияние высоты двумерной шероховатости h_{2d} на развитие стационарных структур:
 $a - h_{2d} = 0$ мм; $б - h_{2d} = 0,91$ мм; $в - h_{2d} = 1,3$ мм

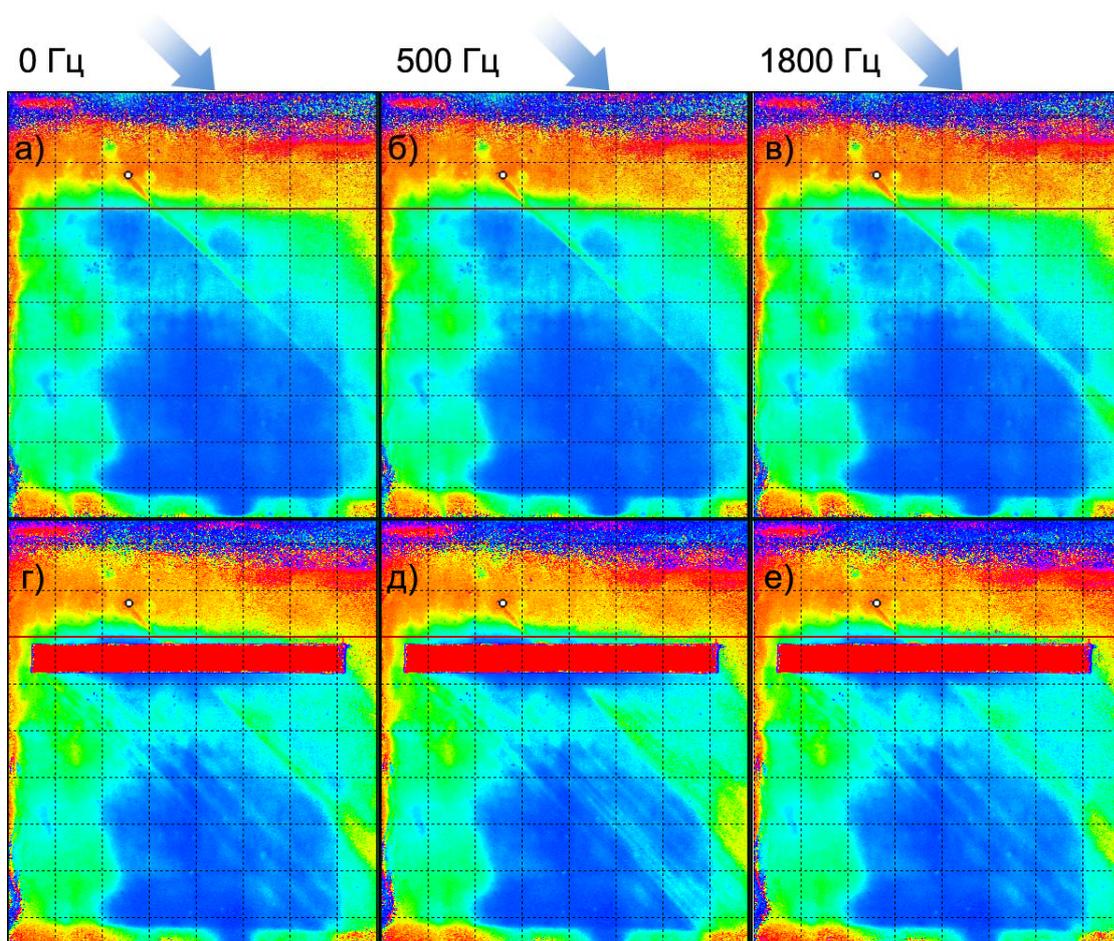


Рис. 6. Возбуждение вторичных возмущений акустическим полем частотой f ($f = 0$ Гц для $a, г$; $f = 500$ Гц для $б, д$; $f = 1800$ Гц для $в, е$) при возбуждении стационарных возмущений только цилиндрической шероховатостью ($a-в$) и при взаимодействии с двумерной шероховатостью высотой $h_{2d} = 0,91$ мм ($г-е$)

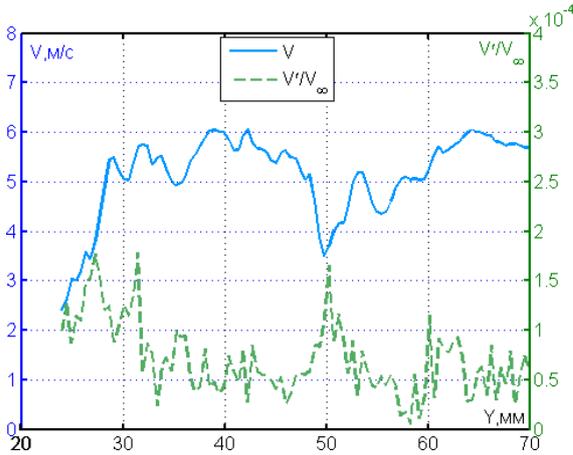


Рис. 7. Распределение средней скорости и амплитуды возбужденной моды частотой 700 Гц над двумерной шероховатостью

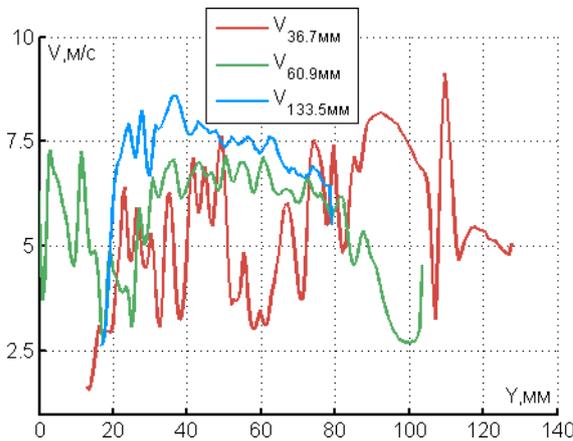


Рис. 8. Распределение скорости за дву- и трехмерной шероховатостью на разных расстояниях X_w

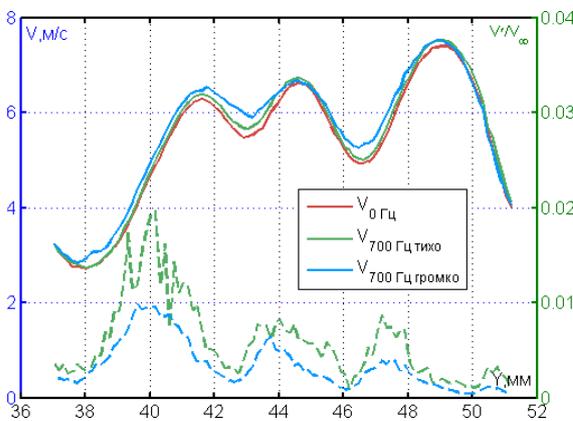


Рис. 9. Распределение средней скорости (сплошные линии) и амплитуды 700 Гц моды (пунктирные линии) за двумерной шероховатостью на расстоянии $X_w = 39$ мм (амплитуда 700 Гц моды для громкого режима уменьшена в 10 раз)

Следующим шагом было исследовано возбуждение вторичных возмущений с помощью акустики. Цилиндрическая шероховатость возбуждает стационарные вихри, приводящие к появлению пакета вторичных возмущений на частотах около 1800 Гц (рис. 6, в). Даже при взаимодействии с двумерной шероховатостью преобладающая усиливающаяся частота не меняется (рис. 6, е). Однако стационарные вихри, возбужденные двумерной шероховатостью, приводят к появлению пакета вторичных возмущений на более низких частотах – около 500 Гц (рис. 6, д). Таким образом, можно говорить о разной структуре стационарных вихрей.

Термоанемометрия позволила исследовать течение над двумерной шероховатостью (рис. 7). Из результатов видно, что продольные структуры начинают формироваться на переднем краю ступеньки. Поперечный масштаб этих возмущений составляет $\lambda_y = 4-8$ мм. Введение акустических возмущений на частоте 700 Гц приводит к появлению сигнала амплитудой до 0,015 %. Причем максимальные значения достигаются вблизи точек перегиба в трансверсальном распределении скорости.

Распределение средней скорости за шероховатостью на расстояниях $X_w = 36,7, 60,9$ и 133,5 мм представлено на рис. 8. Поперечный масштаб продольных структур составляет $\lambda_y = 4-5$ мм, что попадает в диапазон затравок, зарождающихся на передней кромке двумерной шероховатости. Амплитуда продольных возмущений уменьшается вдоль по течению. При этом не рассматривались возмущения, создаваемые концами двумерной шероховатости, а также трехмерной цилиндрической шероховатостью.

Более подробное исследование продольных вихрей и вторичной неустойчивости на них было проведено в области, в которой концы двумерной шероховатости не оказывали влияния. На рис. 9. представлено распределение средней скорости и амплитуды возмущения частотой 700 Гц при возбуждении акустикой с разным уровнем громкости в положении $X_w = 39$ мм. На графике видно, что вторичные возмущения возбуждаются вблизи точек перегиба в трансверсальном распределении средней скорости. Чтобы иметь возможность сравнить между собой характер распределения амплитуды по пространству, амплитуда возмущения при воз-

буждении акустикой большой амплитуды уменьшена в 10 раз.

В точке вблизи одного из максимумов $Y = 47,2$ мм представлен спектр пульсаций скорости (рис. 10). Видно, что имеется волновой пакет, лежащий в диапазоне частот 400–900 Гц. Акустическое воздействие приводит к возбуждению выделенной моды, но не приводит к изменению спектра скорости. Возбуждение акустикой большой амплитуды приводит к появлению второй гармоники вторичного возмущения.

В положении $X_w = 94$ мм характер распределения скорости более сглаженный по сравнению с $X_w = 39$ мм (рис. 11). Распределение амплитуды 700 Гц моды достаточно зашумленное, максимумы выражены слабее, амплитуда моды вторичного возмущения меньше.

Спектр скорости в точке $Y = 47,9$ мм является турбулентным (рис. 12). При этом на спектре возмущение с частотой 700 Гц не выделяется.

Вторичные возмущения были исследованы с помощью методики контролируемых возмущений. Для упрощения термоанемометрических измерений было решено провести измерения по траектории вдоль оси X_w при фиксированном Y . Из-за того, что исследуемый режим получился «жестким» (достаточно высокая скорость набегающего потока в сочетании с большой высотой двумерной шероховатости), рост амплитуды моды 700 Гц происходит всего на протяжении 3 мм вдоль траектории, а потом происходит уменьшение амплитуды (рис. 13, а).

Измерения фазы по траектории (рис. 13, б) показали, что мы имеем дело с бегущими вторичными возмущениями, длина волны которых значительно меньше акустических возмущений.

Обсуждение результатов

Интересным результатом выглядит возбуждение трехмерных продольных структур двумерной шероховатостью. Наличие поперечного течения делает пограничный слой восприимчивым к локализованным неоднородностям в трансверсальном распределении скорости, возникающим из-за неидеальности поверхности двумерной шероховатости. Механизм отбора по длинам волн выделяет наиболее усиливающиеся.

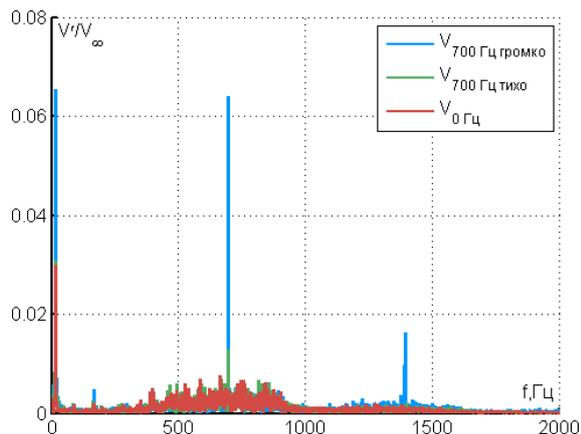


Рис. 10. Спектры пульсаций в точке $X_w = 39$ мм, $Y = 47,2$ мм

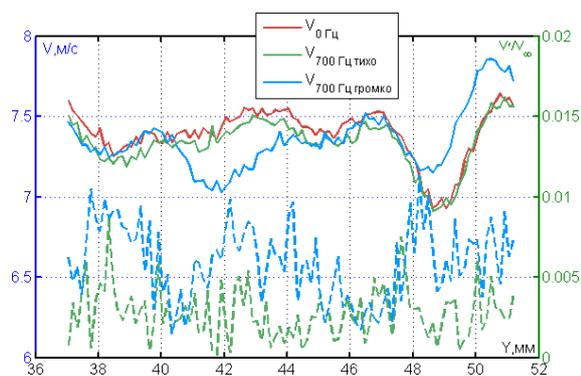


Рис. 11. Распределение средней скорости (сплошные линии) и амплитуды 700 Гц моды (пунктирные линии) за двумерной шероховатостью на расстоянии $X_w = 94$ мм

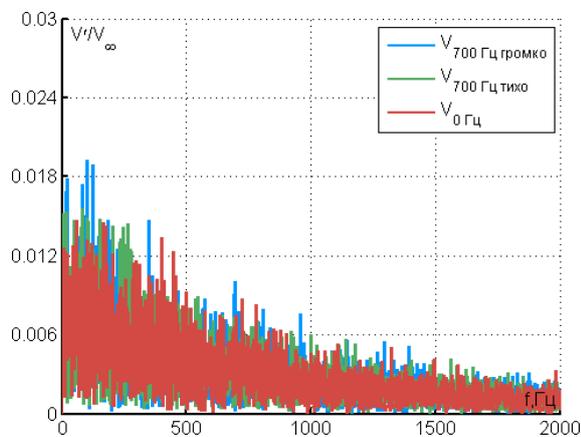


Рис. 12. Спектры пульсаций в точке $X_w = 94$ мм, $Y = 47,9$ мм

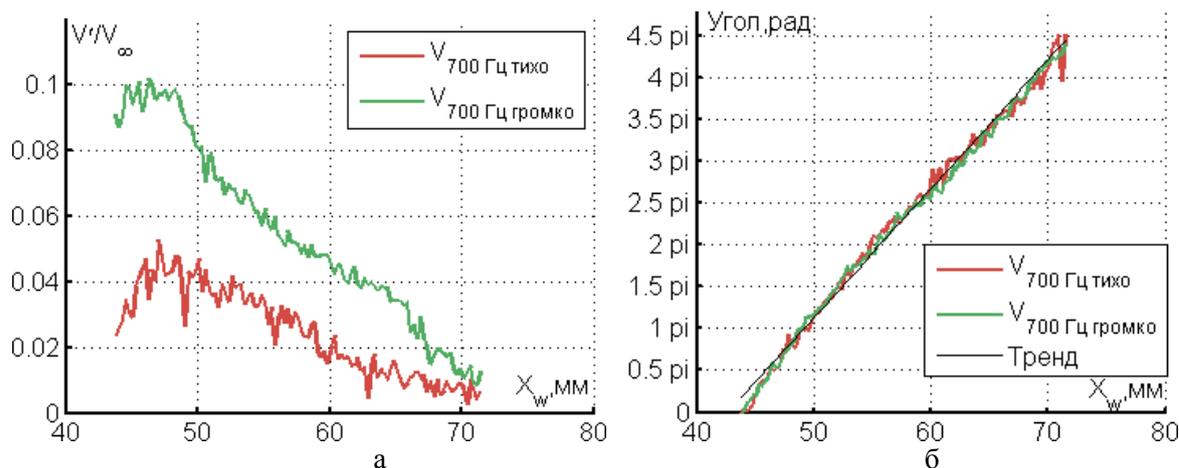


Рис. 13. Изменение амплитуды (а) и фазы (б) возмущения 700 Гц моды при $Y = 49,2$ мм

Второй интересный факт связан с различием частот вторичных возмущений, возбужденных цилиндрической и двумерной шероховатостями.

Выводы

В работе обнаружено дестабилизирующее влияние двумерной шероховатости на развитие возмущений за трехмерной шероховатостью. Кроме того, сама по себе двумерная шероховатость приводит к появлению стационарных вихрей. Однако частоты нарастающих вторичных возмущений в стационарных вихрях, порожденных трехмерной и двумерной шероховатостями, отличаются друг от друга.

Термоанемометрические измерения показали, что продольные структуры зарождаются на передней ступеньке двумерной шероховатости. Над самой двумерной шероховатостью в области точек перегиба в трансверсальном распределении скорости зарождаются вторичные возмущения. Задняя ступенька приводит к появлению локального отрыва, что способствует резкому росту возмущений.

В развитии вторичных возмущений вниз по течению может подключаться механизм появления кратных гармоник, если амплитуда становится достаточно высокой (более 1,5 % скорости набегающего потока). В ко-

нечном счете течение становится турбулентным, что приводит к уменьшению амплитуды стационарного возмущения.

Список литературы

1. Бойко А. В., Козлов В. В., Сызранцев В. В., Щербаков В. А. Экспериментальное исследование процесса перехода к турбулентности на одиночном стационарном возмущении в пограничном слое скользящего крыла // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 1. С. 72–84.
2. Chernoray V. G., Dovgal A. V., Kozlov V. V., Lofdahl L. Secondary Instability of a Swept-Wing Boundary Layer Disturbed by Controlled Roughness Elements // Journal of Visualization. 2010. Vol. 13. P. 251–256.
3. White E. B., Saric W. S. Secondary Instability of Crossflow Vortices // J. Fluid Mech. 2005. Vol. 525. P. 275–308.
4. Толкачев С. Н., Горев В. Н., Козлов В. В. Исследование возникновения и развития стационарных и вторичных возмущений в области благоприятного градиента давления на скользящем крыле // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2013. Т. 8, вып. 2. С. 55–69.
5. Толкачев С. Н., Горев В. Н., Жаркова Г. М., Коврижина В. Н. Экспериментальные методики изучения структуры вихревых возмущений, порождаемых точечным вдувом, на передней кромке скользящего

крыла // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2012. Т. 7, вып. 2. С. 66–79.

6. Брыляков А. П., Жаркова Г. М., Занин Б. Ю., Коврижина В. Н., Сбоев Д. С. Влияние турбулентности набегающего по-

тока на структуру течения на клине и наветренной стороне профиля // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 4. С. 64–71.

Материал поступил в редколлегию 26.11.2014

S. N. Tolkahev, V. S. Kaprilevskaya, V. V. Kozlov

**THE ROLE OF TWO-DIMENSIONAL ROUGHNESS ELEMENT
IN THE LAMINAR-TURBULENT PROCESS IN THE FAVORABLE PRESSURE GRADIENT
OF THE SWEEP WING**

In the article using a liquid crystal thermography investigated the development of stationary and secondary disturbances, which were excited by cylindrical and two-dimensional roughness elements. It was shown, that two-dimensional roughness element has a destabilizing effect on disturbances, induced by cylindrical roughness element. Also the two-dimensional roughness element is able to excite the stationary structures, and then the secondary disturbances the frequency interval of which is lower than in the case of stationary vortices excitation by cylindrical roughness element.

Keywords: laminar-turbulent transition, swept wing, roughness, cross-flow instability, secondary instability, liquid crystal thermography, three-dimensional boundary layer.