

УДК 532.526

## УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ СТАЦИОНАРНЫХ ПРОДОЛЬНЫХ СТРУКТУР В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЕ С ПОМОЩЬЮ РИБЛЕТ

Д. С. Лохов, А. В. Бойко, Д. С. Сбоев

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск  
E-mails: denis.lokhov@gmail.com, sboev@itam.nsc.ru

Приведены результаты экспериментов по управлению продольными структурами в пограничном слое на плоской пластине. Продольные структуры возбуждались контролируемым вихревым возмущением внешнего потока посредством механизма распределенной восприимчивости. Показано, что риблеты снижают интенсивность как стационарных, так и бегущих возмущений. Наиболее благоприятными для применения риблет являются линейный и слабонелинейный этапы развития возмущений в пограничном слое.

**Ключевые слова:** пограничный слой, распределенная восприимчивость, продольные структуры, управление, риблеты.

**Введение.** Известно, что во многих случаях доминирующую роль в процессе ламинарно-турбулентного перехода играют продольные структуры. Примером является переход в условиях повышенной степени турбулентности набегающего потока. Возникающие при этом продольные структуры в дальнейшем испытывают вторичную неустойчивость, приводящую к возникновению турбулентных пятен [1].

В настоящее время механизмы возникновения продольных структур в пограничном слое в качестве первичной неустойчивости в “естественных” условиях окончательно не выяснены. Модельные эксперименты показывают, что возбуждение этих возмущений внешней турбулентностью может осуществляться посредством как локализованной [2], так и распределенной [3, 4] восприимчивости.

Экспериментальные исследования по контролю за развитием в пограничном слое продольных структур сравнительно немногочисленны. В работе [5] применен метод активного контроля за локализованными в пространстве и во времени продольными структурами (так называемыми паффами) с помощью локализованного вдува-отсоса через отверстие в стенке. В [6] рост таких же возмущений подавлялся с помощью колебаний стенки в трансверсальном направлении, а в [7] — посредством риблет. Работа [8] посвящена изучению влияния риблет на продольные вихри, возбуждаемые с помощью элементов шероховатости в пограничном слое на плоской пластине, а [9] — на скользящем крыле. Данные исследования были успешными в том смысле, что в них получено снижение энергии возмущений при использовании контроля. Следует отметить, что все эти эксперименты посвящены контролю за возмущениями, возбужденными посредством локализованных механизмов восприимчивости.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 02-01-00006), фонда “Ведущие научные школы России” (грант № НШ-964.2003.1) и Международного фонда INTAS (грант № 00-00323).

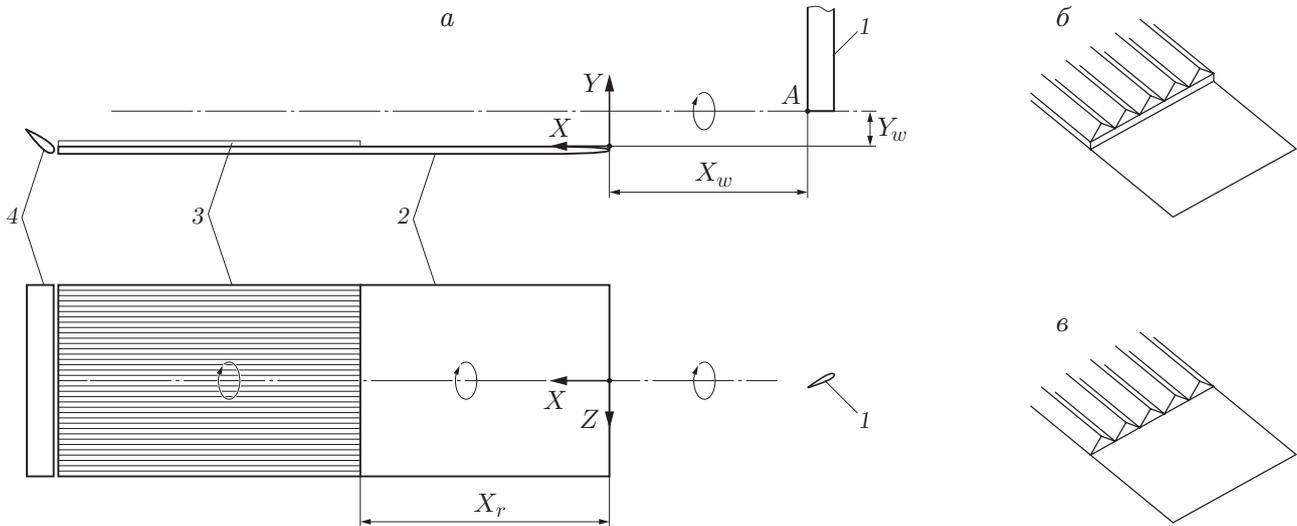


Рис. 1. Схема эксперимента (а) и схемы установки риблет (б, в):  
1 — микрокрыло; 2 — плоская пластина; 3 — риблеты; 4 — закрылок

Распределенная генерация стационарной продольной структуры в ламинарном пограничном слое на плоской пластине подробно изучена в [3, 4]. Данные этих экспериментов хорошо согласуются с результатами теоретических работ [10–12]. В отличие от локализованной генерации распределенная восприимчивость обеспечивает непрерывный поток энергии от внешних возмущений к возмущениям внутри пограничного слоя [13], что может понизить эффективность контроля. Работы по контролю за возмущениями, возникающими в результате распределенной восприимчивости, до настоящего времени не выполнялись и поэтому достаточно актуальны.

Риблеты, как известно, представляют собой продольное оребрение поверхности тела и являются эффективным пассивным средством контроля за пограничным слоем как в турбулентных потоках [14], так и на ранних нелинейных стадиях ламинарно-турбулентного перехода [15]. К их достоинствам следует отнести простоту изготовления и стойкость к внешним воздействиям. Ламинарно-турбулентный переход в условиях повышенной степени турбулентности набегающего потока часто встречается в задачах внутренней аэродинамики, например при проектировании лопаток газотурбинных двигателей. При этом различные неблагоприятные факторы (такие как высокие температуры внешнего потока и большие тепловые потоки к стенке) могут затруднить использование активных методов контроля. Этими обстоятельствами обусловлен выбор в данной работе риблет как основного метода контроля за течением.

**Методика проведения экспериментов.** Эксперименты проведены в аэродинамической трубе МТ-324 Института теоретической и прикладной механики СО РАН. Степень турбулентности внешнего потока не превышала 0,1 %. Модель представляла собой плоскую плексигласовую пластину размерами  $700 \times 200 \times 10$  мм, установленную в рабочей части трубы под нулевым углом атаки. Передняя кромка пластины составлена из двух полуэллипсов с отношениями полуосей  $132 : 8$  мм для нижней поверхности и  $132 : 2$  мм для верхней. Градиент давления над поверхностью модели регулировался с помощью закрепленного на задней кромке закрылка.

Эксперименты выполнены в контролируемых условиях. Методика возбуждения стационарной продольной структуры в пограничном слое аналогична использованной впервые в работе [3] и состоит в следующем. Впереди передней кромки модели и над ее поверхно-

стью размещено микрокрыло, закрепленное под некоторым углом атаки вертикально на верхней стенке рабочей части трубы (рис. 1). В работе [3] показано, что взаимодействие с пограничным слоем концевой вихря, сходящего со свободного конца микрокрыла и развивающегося над поверхностью пластины во внешнем потоке, приводит к возникновению внутри слоя стационарной продольной структуры. Поскольку концевой вихрь является стационарным, он обеспечивает распределенную генерацию возмущений в пограничном слое, что подтверждается также данными работы [4]. Основным механизмом генерации продольной структуры является так называемый подъемный эффект (lift-up effect) [1, 16]. Интенсивность концевой вихря и продольной структуры может регулироваться изменением угла атаки микрокрыла и скорости потока.

Принята следующая система координат: ось  $X$  направлена вниз по потоку, ось  $Y$  — перпендикулярно к поверхности пластины, ось  $Z$  — параллельно передней кромке пластины. Начало координат расположено на передней кромке пластины напротив вихреобразующего конца микрокрыла.

В данной работе представлены результаты двух серий измерений, которые различались использованными микрокрыльями, способом установки риблет и скоростью набегающего потока. В первой серии экспериментов использовано микрокрыло с ламинаризованным профилем Вортманна FXL V152 с хордой 5 мм и толщиной 0,6 мм (рис. 2). Это микрокрыло применялось также в работе [4]. Скорость набегающего потока  $U_0 = 7,5$  м/с. Во второй серии экспериментов использовано изготовленное авторами микрокрыло, профиль которого также показан на рис. 2. Хорда этого микрокрыла 6 мм, толщина 0,7 мм. Скорость набегающего потока для двух режимов в этой серии экспериментов равна 4,2 и 6 м/с. Расстояния от вихреобразующего крыла (координаты точки  $A$  на рис. 1,  $a$ ) до передней кромки модели указаны в таблице.

В данных экспериментах использованы риблеты, разработанные авторами работы [15]. Они представляли собой тонкое покрытие с параллельными канавками треугольного (с углами раствора около  $60^\circ$ ) сечения на его поверхности. Риблеты высотой 1 мм покрывали пластину по всей ширине, канавки направлены по потоку. Две серии экспериментов различались между собой способом установки риблет. В первой серии риблеты

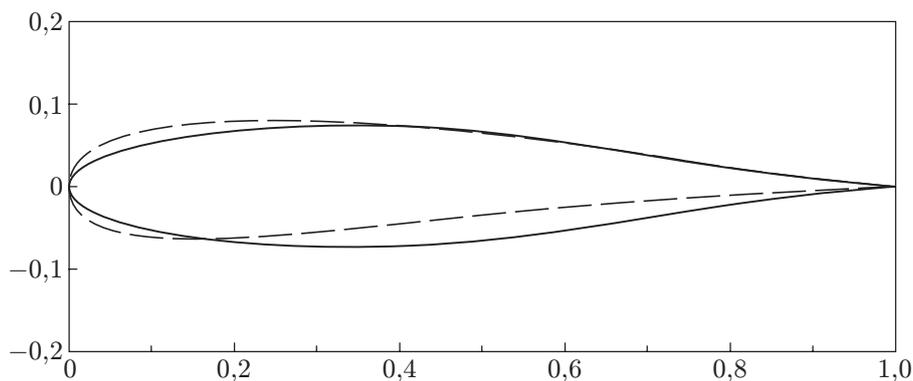


Рис. 2. Профиль FXL V152 (сплошная линия) и профиль микрокрыла, изготовленного авторами (штриховая линия)

Серия экспериментов	$X_w$ , мм	$Y_w$ , мм	$X_r$ , мм
Первая	100	15	220
Вторая	112	12	150

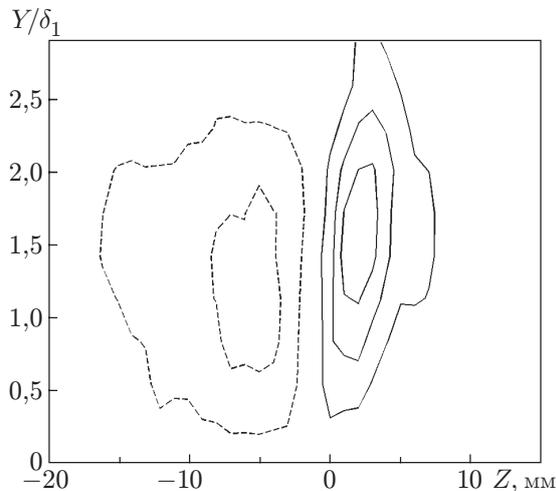


Рис. 3. Изолинии дефекта средней скорости в пограничном слое при  $X = 200$  мм:

сплошные кривые — отрицательные отклонения; штриховые — положительные отклонения

устанавливались на модель таким образом, что возникала ступенька между подложкой риблетного покрытия и поверхностью гладкой модели (см. рис. 1, б). Во второй серии подложка была утоплена в модель и над ее поверхностью выступали только ребра покрытия (см. рис. 1, в). Координаты начала оребренной поверхности для обеих серий измерений также указаны в таблице.

Продольная компонента скорости потока измерялась однопунктным датчиком термоанемометра постоянной температуры, выходные данные термоанемометра оцифровывались 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем, линеаризовывались и заносились в компьютер для дальнейшей обработки, которая осуществлялась в среде MatLab. Координатник, с помощью которого перемещался датчик, позволял производить пространственные измерения с точностью 0,1 мм вдоль осей  $X$ ,  $Z$  и 0,01 мм вдоль оси  $Y$ .

**Первая серия экспериментов.** На рис. 3 показаны изолинии дефекта средней скорости в возмущенном пограничном слое над гладкой моделью при  $X = 200$  мм. Эти распределения получены путем вычитания из измеренных в возмущенном пограничном слое профилей средней скорости таких же профилей в невозмущенном течении. Видно, что в плоскости  $(Y, Z)$  изучаемое стационарное возмущение состоит из двух расположенных рядом областей положительного и отрицательного дефектов скорости, локализованных по трансверсальной координате, максимум возмущения расположен при  $Y/\delta_1 \approx 1,3 \div 1,5$ , где  $\delta_1$  — толщина вытеснения невозмущенного пограничного слоя. Полученные над гладкой пластиной результаты находятся в хорошем согласии с данными работы [4], это свидетельствует о том, что в пограничном слое посредством механизма распределенной восприимчивости была сгенерирована стационарная продольная структура. В [4] приведены данные измерений в концевом вихре этого же микрокрыла при примерно таких же угле атаки и скорости набегающего потока и показано, что этот вихрь является ламинарным. Измерения пульсаций скорости в пограничном слое также не выявили отличий от невозмущенного течения.

Наиболее простым способом оценки роста возмущений является его характеристика по так называемой магнитуде  $\Delta U = U_{\max} - U_{\min}$ , т. е. по разности между максимальным и минимальным значениями скорости в ее распределениях по трансверсальной координате, измеренных при различных значениях  $X$  и  $Y/\delta_1 = \text{const}$ . Пример такого распределения показан на рис. 4. В данной серии экспериментов измерения выполнялись при  $Y/\delta_1 = 1,4$ .

Наращение стационарных возмущений на гладкой модели показано на рис. 5 (точки 1 и 2 соответствуют данным, полученным в двух независимых измерениях). Это позволяет охарактеризовать повторяемость результатов как хорошую. Видно, что величина

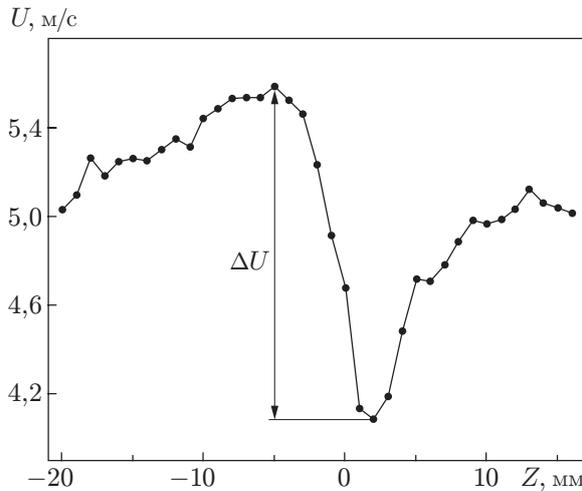


Рис. 4

Рис. 4. Распределение средней скорости при  $X = 200$  мм,  $Y/\delta_1 = 1,4$

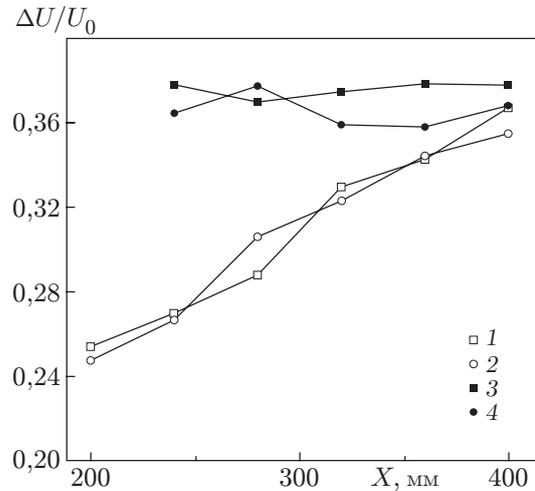


Рис. 5

Рис. 5. Зависимость магнитуды стационарного возмущения от продольной координаты:

1, 2 — над гладкой поверхностью; 3, 4 — над оребренной поверхностью

искажения возмущения линейно растет с увеличением продольной координаты. Значения  $\Delta U/U$  в измеренном диапазоне по  $X$  достигают примерно 37 %. Линейный характер роста магнитуды находится в хорошем согласии с результатами работ [3, 4, 10]. Зависимости магнитуды продольной структуры над оребренной поверхностью от продольной координаты, полученные в двух независимых измерениях, также приведены на рис. 5 (точки 3, 4). Как следует из этих зависимостей, риблеты предотвращают рост возмущений вниз по потоку, однако в данной серии экспериментов наблюдалось значительное увеличение магнитуды возмущений в случае использования риблет. Было сделано предположение, что такой рост магнитуды может быть вызван влиянием ступеньки, возникающей между подложкой риблетного покрытия и поверхностью модели. Такая ситуация описана, например, в работе [15]. С целью проверки этого предположения была выполнена вторая серия экспериментов, в которой, как указывалось выше, подложка риблет утоплена в модель.

**Вторая серия экспериментов.** Помимо различия в способах установки риблет в данной серии измерений по технологическим причинам было использовано микрокрыло другой конструкции и с иным профилем: по сравнению с ламинаризованным профилем Вортманна сечение максимальной относительной толщины сдвинуто к носику (см. рис. 2). Как известно [17], большие коэффициенты подъемной силы (а следовательно, и концевые вихри достаточной интенсивности) для таких профилей наблюдаются в тех режимах, когда на верхней поверхности профиля реализуется течение с отрывным пузырем и последующим присоединением турбулентного пограничного слоя. По этой причине концевой вихрь в данной серии измерений был турбулентным. Интенсивность пульсаций продольной компоненты скорости над внешней границей пограничного слоя под ядром вихря (при  $Z = 4$  мм) составила 1,6 % при  $X = 45$  мм и 1,3 % при  $X = 265$  мм.

Так же как в первой серии экспериментов, в этом случае стационарное возмущение состояло из двух локализованных по трансверсальной координате и расположенных рядом областей положительного и отрицательного дефектов скорости. Наличие не только распределенной генерации стационарных продольных структур, но и непрерывного воз-

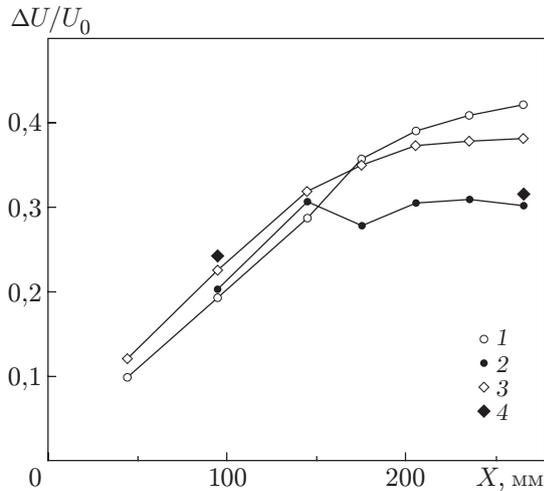


Рис. 6. Зависимость магнитуды стационарного возмущения от продольной координаты:

1, 3 — над гладкой поверхностью; 2, 4 — над оребренной поверхностью; 1, 2 —  $U_0 = 4,2$  м/с; 3, 4 —  $U_0 = 6$  м/с

действия на пограничный слой нестационарных возмущений привело к некоторым различиям в развитии возмущений внутри слоя. В частности, в данном случае нестационарные возмущения внутри пограничного слоя также нарастали вниз по потоку. Взаимодействие стационарной продольной структуры и бегущих возмущений в пограничном слое привело к нелинейному развитию продольной структуры и возникновению вторичной неустойчивости. Подробное описание этих процессов не является целью данной работы. Заметим, однако, что вторичная неустойчивость в данном случае проявлялась в нарушении линейного характера роста магнитуды продольной структуры вследствие выхода продольной координаты на насыщение (точки 1 и 3 на рис. 6), бурного роста высокочастотных возмущений вниз по потоку и последующего возникновения турбулентного клина. При возрастании локального числа Рейнольдса с увеличением скорости набегающего потока начало этих процессов смещалось вверх по потоку, а вторичная неустойчивость наступала при меньшей магнитуде продольной структуры.

Зависимости магнитуды стационарного возмущения от продольной координаты для гладкой и оребренной моделей показаны на рис. 6. Измерения выполнены при  $Y/\delta_1 = 1$ . Напомним, что в данном случае передняя кромка риблет располагалась на расстоянии  $X = 150$  мм. Результаты, полученные при  $X = 95$  мм, т. е. над гладкой поверхностью, показывают хорошую воспроизводимость измерений. На рис. 6 видно, что в данном случае применение риблет, так же как и в предыдущем случае, останавливает рост магнитуды вниз по потоку (точки 2). Однако влияния подложки не наблюдается, и магнитуда продольной структуры на оребренной поверхности всегда меньше, чем на гладкой.

Интересно отметить одно обстоятельство: при возрастании  $U_0$  эффективность подавления риблетами продольной структуры понижается. Это следует из данных, полученных при  $X = 265$  мм (рис. 6): при  $U_0 = 4,2$  м/с магнитуда на оребренной поверхности уменьшилась на 29 %, а при  $U_0 = 6$  м/с — на 15 %. Основное различие между этими режимами состоит в более раннем начале нелинейного развития продольной структуры при возрастании скорости набегающего потока. На рис. 5 видно, что при  $U_0 = 4,2$  м/с на гладкой модели стадия нелинейного насыщения начинается при  $X > 175$  мм, т. е. в этом случае риблеты первоначально воздействуют на структуру, находящуюся на линейном этапе развития. Увеличение  $U_0$ , как говорилось выше, приводит к смещению местоположения начала нелинейного этапа вверх по потоку ( $X > 145$  мм при  $U_0 = 6$  м/с), и в данном случае риблеты воздействуют уже на нелинейно развивающееся возмущение.

На рис. 7 приведены распределения интегральной по спектру среднеквадратичной амплитуды пульсаций в пограничном слое над гладкой и оребренной поверхностью при

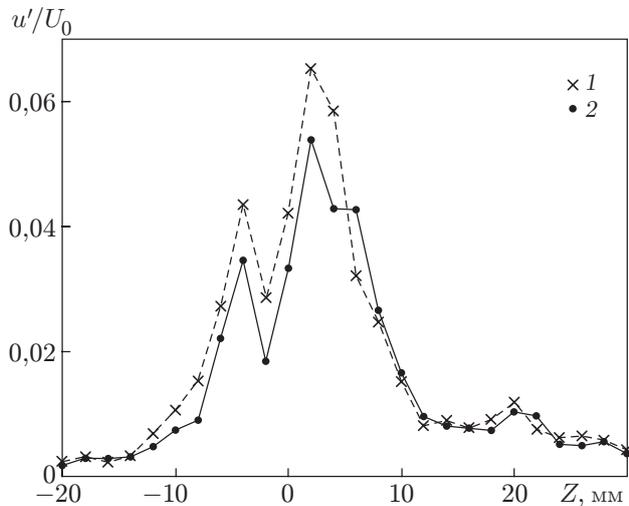


Рис. 7

Рис. 7. Распределения среднеквадратичной амплитуды пульсаций в пограничном слое при  $X = 265$  мм,  $U_0 = 4,2$  м/с:

1 — над гладкой поверхностью; 2 — над оребренной поверхностью

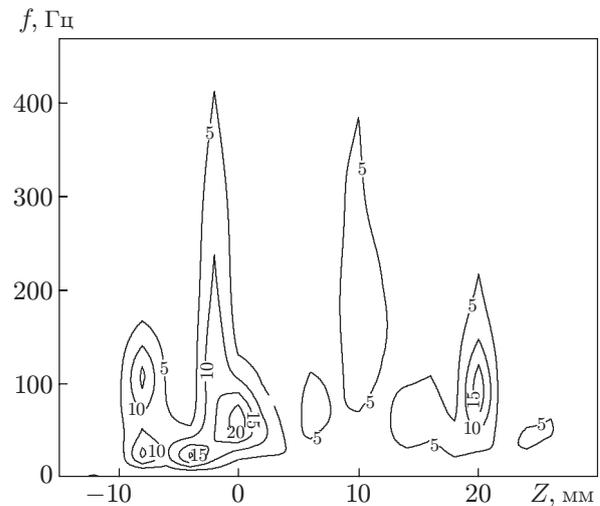


Рис. 8

Рис. 8. Изолинии коэффициента затухания бегущих возмущений над оребренной поверхностью при  $X = 265$  мм,  $U_0 = 4,2$  м/с

$U_0 = 4,2$  м/с,  $X = 265$  мм. Для гладкой поверхности эти данные получены в режиме интенсивно развивающейся вторичной неустойчивости. Пики в распределениях пульсаций соответствуют местоположению наибольших градиентов средней скорости по трансверсальной координате, что хорошо коррелирует с известными результатами по вторичной неустойчивости продольных структур [1, 9]. Видно, что над оребренной поверхностью интегральная по спектру амплитуда пульсаций снижается. Зависимость коэффициента затухания от трансверсальной координаты показана на рис. 8 для разных частот в виде изолиний. Наибольшее затухание (в 10–20 раз) испытывают возмущения с частотой от 20 до 250 Гц, локализованные внутри стационарной продольной структуры ( $-10 \text{ мм} < Z < 5 \text{ мм}$ ), т. е. развивающиеся в результате ее вторичной неустойчивости. Этот результат аналогичен полученному в [9] для пакета волн неустойчивости, развивающегося в стационарном продольном вихре над оребренным скользящим крылом. Затухание высокочастотных пульсаций обусловлено уменьшением градиентов средней скорости по трансверсальной координате в стационарной продольной структуре над оребренной поверхностью по сравнению с гладкой. Относительно небольшое уменьшение интегральной по спектру амплитуды пульсаций (см. рис. 7) объясняется тем, что доминирующие в спектрах возмущения частотой до 10 Гц над оребренной поверхностью затухают слабо.

**Выводы.** Показано, что риблеты могут быть успешно использованы для контроля продольных структур, возбуждаемых в пограничном слое посредством механизма распределенной восприимчивости. Такой контроль может применяться как к ламинарным продольным структурам, так и к возмущениям указанного типа, находящимся на нелинейной стадии развития. В последнем случае контроль является менее эффективным. В случае использования риблет на стадии вторичной неустойчивости они могут оказывать благоприятное воздействие путем подавления высокочастотных пульсаций, развивающихся внутри продольной структуры.

Авторы выражают благодарность В. В. Козлову за полезные обсуждения результатов и хода экспериментов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В.** Возникновение турбулентности в пристенных течениях. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1999.
2. **Boiko A. V., Grek G. R., Sboev D. S.** Spectral analysis of localized disturbances in boundary layer at subcritical Reynolds numbers // *Phys. Fluids*. 2003. V. 15, N 12. P. 3613–3624.
3. **Bertolotti F. P., Kendall J. M.** Response of the Blasius boundary layer to controlled free-stream vortices of axial form. N. Y., 1997. (Paper / AIAA; N 97-2018).
4. **Бойко А. В.** Восприимчивость пограничного слоя плоской пластины к стационарному вихревому возмущению внешнего потока // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 2001. № 6. С. 71–82.
5. **Катасонов М. М., Козлов В. В.** Активное управление продольными структурами в пограничном слое // 3-й Междунар. семинар “Устойчивость гомогенных и гетерогенных жидкостей”: Тез. докл. Новосибирск, 24–26 апр. 1996 г. Новосибирск: Ин-т теорет. и прикл. механики, 1996. С. 44–46.
6. **Катасонов М. М., Козлов В. В.** Влияние поперечных колебаний поверхности на развитие продольных “полосчатых” структур и зарождающихся турбулентных пятен (incipient spot). Новосибирск, 1997. (Препр. / РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т теорет. и прикл. механики; № 5-97).
7. **Альфредссон П. Х., Бакчинов А. А., Катасонов М. М., Козлов В. В.** Управление ламинарно-турбулентным переходом при высокой степени турбулентности набегающего потока с помощью локализованного отсоса. Новосибирск, 1998. (Препр. / РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т теорет. и прикл. механики; № 4-98).
8. **Grek G. R., Kozlov V. V., Titarenko S. V., Klingmann B. G. B.** The influence of riblets on a boundary layer with embedded streamwise vortices // *Phys. Fluids A*. 1995. V. 7, N 10. P. 2504–2506.
9. **Бойко А. В., Козлов В. В., Сызранцев В. В., Щербаков В. А.** Управление при помощи риблет ламинарно-турбулентным переходом в стационарном вихре на скользящем крыле // *Теплофизика и аэромеханика*. 1996. Т. 3, № 1. С. 82–94.
10. **Bertolotti F. P.** Response of the Blasius boundary layer to freestream vorticity // *Phys. Fluids*. 1999. V. 9, N 8. P. 2286–2299.
11. **Luchini P.** Reynolds-number-independent instability of the boundary layer over a flat surface: optimal perturbations // *J. Fluid Mech*. 2000. V. 404. P. 289–309.
12. **Andersson P., Berggren M., Henningson D. S.** Optimal disturbances and bypass transition in boundary layers // *Phys. Fluids*. 1999. V. 11, N 1. P. 134–150.
13. **Качанов Ю. С., Козлов В. В., Левченко В. Я.** Возникновение турбулентности в пограничном слое. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982.
14. **Walsh M. J.** Riblets as a viscous drag reduction technique // *AIAA J.* 1983. V. 21, N 4. P. 485–486.
15. **Grek G. R., Kozlov V. V., Titarenko S. V.** An experimental study on the influence of riblets on transition // *J. Fluid Mech*. 1996. V. 315. P. 31–49.
16. **Landahl M. T.** Note on an algebraic instability of inviscid parallel shear flows // *J. Fluid Mech*. 1980. V. 98. P. 243–251.
17. **Кюхеман Д.** Аэродинамическое проектирование самолетов. М.: Машиностроение, 1983.

*Поступила в редакцию 7/VI 2004 г.*