

УДК 532.526

## УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ И МОДУЛИРОВАННЫХ ВО ВРЕМЕНИ ЛОКАЛЬНЫХ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ

А. В. Бойко, А. В. Довгаль, В. В. Козлов, А. М. Сорокин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия

E-mails: boiko@itam.nsc.ru, dovgal@itam.nsc.ru, kozlov@itam.nsc.ru, am\_sorokin@ngs.ru

Приведен обзор полученных авторами в последние годы результатов исследований устойчивости течений с отрывом ламинарного пограничного слоя в условиях их пространственно-временной модуляции. Эти результаты дают представление о влиянии периодических неоднородностей отрывной зоны на развитие ее гидродинамических возмущений и переход в турбулентное состояние вблизи поверхности тела, обтекаемого низкоскоростным воздушным потоком.

**Ключевые слова:** отрыв ламинарного потока, пространственно-временная модуляция течения, гидродинамическая неустойчивость, переход к турбулентности.

DOI: 10.15372/PMTF20210303

**Введение.** Отрыв пограничного слоя от поверхности тела в потоке газа (жидкости) является предметом экспериментальных и теоретических исследований, которые проводятся на протяжении последних десятилетий. Многочисленные экспериментальные и расчетные данные получены для отрывных течений при до-, сверх- и гиперзвуковых скоростях, отрыве ламинарного и турбулентного пограничных слоев, формировании локальных и крупномасштабных отрывных областей.

В настоящей работе рассматривается внешнее обтекание тел низкоскоростным ламинарным потоком с образованием локальных отрывных зон, так называемых отрывных пузырей. В основном такие течения исследуются в двумерной постановке при отрыве пограничного слоя в стационарных условиях. Результаты исследований позволяют подробно описать структуру течения в областях отрыва пограничного слоя и их гидродинамическую неустойчивость, определяющую переход пристенного потока в турбулентное состояние.

Представляет интерес исследование влияния периодической модуляции отрывных течений в пространстве и времени на их устойчивость и ламинарно-турбулентный переход. С этим связаны такие практические задачи, как оптимизация процесса обтекания технологических неровностей поверхности, применение систем отсоса пограничного слоя, управление течением с использованием риблет и т. д. В экспериментах часто наблюдаются низкочастотные колебания областей отрыва потока, при возникновении которых неустойчивость течения развивается на фоне крупномасштабного квазипериодического движения.

---

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (коды проектов АААА-А17-117030610128-8, АААА-А19-119051590050-2).

© Бойко А. В., Довгаль А. В., Козлов В. В., Сорокин А. М., 2021

Аналогичные эффекты возможны, например, при натекании вихревого следа на несущую поверхность и ее осцилляциях в набегающем потоке.

Целью исследований, обзор которых приведен в настоящей работе, является моделирование отрывных течений несжимаемого газа, периодически изменяющихся в пространстве и времени, и выявление сопутствующих эффектов гидродинамической неустойчивости. Результаты получены в дозвуковых экспериментальных установках: малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 Института теоретической и прикладной механики (ИТПМ) СО РАН и частично в аэродинамической трубе TUG Отделения Немецкого аэрокосмического общества (Геттинген, Германия). В качестве тестовых моделей использовались продольно обтекаемые плоские пластины с прямоугольным уступом поверхности — классическая конфигурация отрывного течения, исследованная во многих работах. Опытные данные получены с использованием термоанемометрического метода и одноточечных датчиков для регистрации продольной компоненты скорости течения (ее средней по времени и пульсационной составляющих) с последующей компьютерной обработкой результатов измерений. В ряде случаев результаты экспериментов сравнивались с результатами расчетов линейной устойчивости периодического отрывного течения.

**1. Предварительные исследования.** Прежде чем исследовать влияние пространственно-временной модуляции на характеристики течения в локальных областях отрыва пограничного слоя, рассмотрим их образование в номинально двумерном стационарном потоке несжимаемого газа. Основные структурные элементы отрывного пузыря, формирующегося при отрыве ламинарного пограничного слоя в условиях ламинарно-турбулентного перехода, показаны на рис. 1 в соответствии с работой [1]. Несмотря на то что схема течения приведена для случая отрыва потока от гладкой поверхности, она применима также к локальным областям отрыва при обтекании уступов, выступов и других двумерных неоднородностей поверхности тела.

С точки зрения классической теории устойчивости сдвиговых течений достаточно быстрый переход к турбулентному состоянию за линией отрыва (точка 1 на рис. 1) обусловлен появлением локальных профилей скорости с точкой перегиба вблизи границы зоны циркуляции (кривая 2). Это вызывает близкое к экспоненциальному пространственное нарастание амплитуды возмущений завихренности и турбулизацию оторвавшегося течения (кривая 3) с последующим присоединением потока к поверхности тела (точка 4) и развитием турбулентного пограничного слоя.

Общие закономерности формирования подобных отрывных течений установлены во многих экспериментальных и расчетных работах. Первоначально исследования сводились к определению эмпирических корреляций основных характеристик отрывного обтекания тел и условий его возникновения (см., например, [2–6]). На их основе строились полуэмпи-

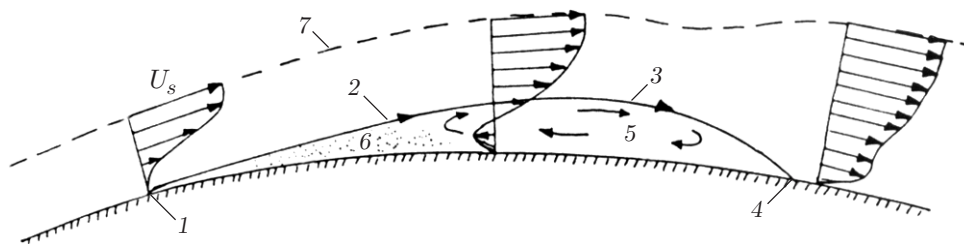


Рис. 1. Схема течения в переходной зоне отрыва пограничного слоя [1]:

1 — точка отрыва ламинарного пограничного слоя, 2 — граница зоны циркуляции, 3 — область нарастания амплитуд возмущений завихренности и турбулизации оторвавшегося течения, 4 — точка присоединения потока к поверхности тела, 5 — зона циркуляции, 6 — застойная зона, 7 — граница пограничного слоя

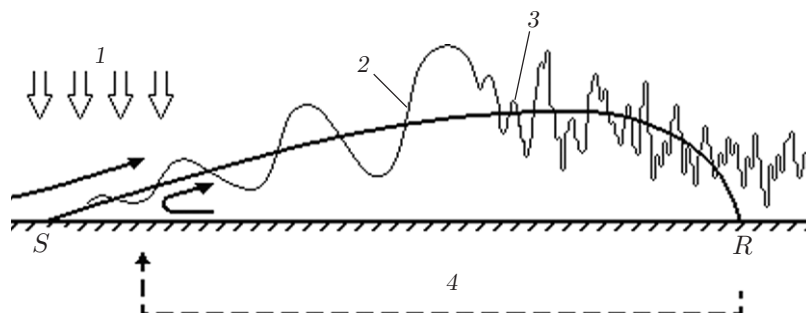


Рис. 2. Образование зоны отрыва пограничного слоя в переходном режиме течения:

1 — область генерации колебаний, 2 — область линейной устойчивости, 3 — область нелинейных возмущений, 4 — область обратного влияния

рические модели с использованием экспериментальных данных о ламинарно-турбулентном переходе в пределах зоны отрыва (см., например, [7–12]). На следующем этапе описания локальных отрывных течений положение перехода в оторвавшемся пограничном слое определялось по результатам расчетов в рамках линейной теории устойчивости квазипараллельных слоев сдвига скорости [13–16]. При моделировании переходных областей отрыва потока в [17–19] получены решения уравнений Навье — Стокса. Более детально описать формирование локальных переходных отрывных течений при внешнем обтекании тел позволяют результаты моделирования их гидродинамической устойчивости.

Согласно общепринятому подходу к описанию ламинарно-турбулентного перехода в конвективно-неустойчивом пограничном слое можно выделить этапы этого перехода, показанные на рис. 2. В их числе генерация с помощью внешних источников возмущений завихренности оторвавшегося пограничного слоя, которая наиболее эффективна, как правило, вблизи точки отрыва  $S$  на участке течения с максимальными градиентами средней скорости. Ниже по потоку происходит пространственное увеличение амплитуды возбужденных колебаний, которое при низком уровне пульсаций потока описывается в рамках линейной теории устойчивости. Когда амплитуда колебаний достигает нескольких процентов скорости внешнего потока, они начинают взаимодействовать. В свою очередь, нелинейная активность возмущений приводит к заполнению частотного спектра пульсаций и присоединению (точка  $R$  на рис. 2) турбулизованного течения к поверхности тела. Особенностью процесса формирования областей отрыва потока (см. рис. 2) является обратное влияние турбулентного течения в зоне присоединения на состояние отрывающегося пограничного слоя (осредненное по времени поле скорости и пульсационные характеристики). Экспериментальному и численному моделированию неустойчивости локальных отрывных течений посвящено большое количество работ (см., например, [20, 21] и библиографию к ним).

**2. Пространственная модуляция отрывных течений.** Пространственно-периодическая модуляция отрывающегося пограничного слоя в поперечном по отношению к потоку направлении исследовалась в работах [22–25]. Базовая тестовая модель представляла собой продольно обтекаемую плоскую пластину с размещенной на ней накладкой, образующей прямоугольный уступ поверхности.

В экспериментальных работах [22–24] периодическое отрывное течение за уступом генерировалось прямоугольными либо цилиндрическими элементами неровности, расположенными перед линией отрыва (рис. 3). Обнаруженное в этих работах влияние неустойчивости заключается в немодовом усилении стационарных возмущений отрывной зоны,

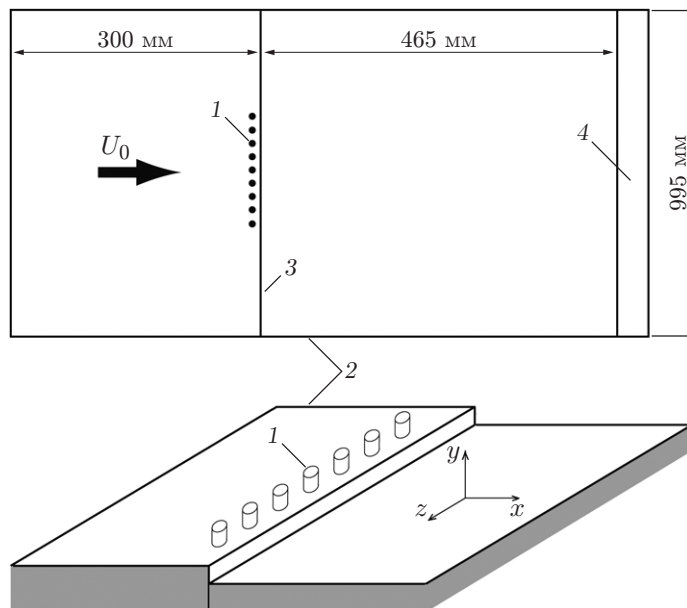


Рис. 3. Тестовая модель для генерации стационарных возмущений отрывного течения за прямоугольным уступом поверхности периодически расположенными элементами неровности [23]:

1 — элементы неровности, 2 — пластина, 3 — уступ ( $h = 3,3$  мм), 4 — закрылок

которое не описывается классической теорией гидродинамической устойчивости [26]. Следует отметить, что в экспериментах и при численном моделировании течений со сдвигом скорости в условиях немодового усиления возмущений наблюдалось возникновение вытянутых в направлении потока полосчатых структур, представляющих собой стационарные и квазистационарные деформации поля скорости. В свою очередь, полосчатые структуры индуцируют дополнительные градиенты скорости течения, способствуя усилению его нестационарных колебаний. Данный способ перехода к турбулентности в присоединенном пограничном слое изучался во многих работах (см., например, [27–29]).

Немодовое усиление стационарных возмущений пространственно-периодического течения за уступом поверхности плоской пластины наблюдалось в экспериментальной работе [22] и в работе [23], в которой данные экспериментов сопоставлялись с результатами расчета линейной устойчивости отрывного течения, возмущенного элементами неровности. На рис. 4 представлены профили продольной компоненты скорости осредненного по времени течения в следе за элементами неровности и в плоскостях симметрии между соседними элементами ( $x$  — продольная координата с началом отсчета на уступе поверхности модели;  $y$  — координата по нормали к поверхности;  $s$ ,  $b$  — пространственный период элементов неровности и их высота; линейные размеры нормированы на высоту уступа ( $h = 3,3$  мм);  $U_e$ ,  $U_0$  — соответственно локальная скорость внешнего потока, слабо зависящая от продольной координаты, и ее величина над уступом;  $Re_h = U_0 h / \nu = 1350$  — число Рейнольдса).

Установлено, что эволюция стационарного возмущения области отрыва зависит от пространственной конфигурации системы элементов неровности (их высоты и периодического расположения) и качественно различается. Изменения вдоль продольной координаты максимальных положительных и отрицательных отклонений осредненной по времени скорости от ее величины, осредненной в трансверсальном по отношению к потоку направлении, в условиях эксперимента [23] показаны на рис. 5. В первом случае модуляция

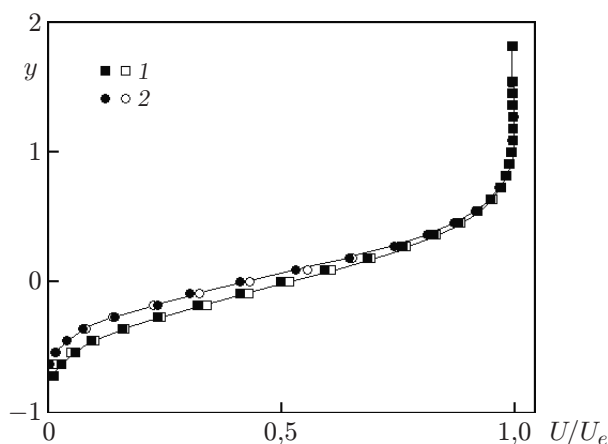


Рис. 4. Профили продольной компоненты скорости осредненного по времени течения в следе за элементами неровности (1) и в плоскостях симметрии между соседними элементами (2) при  $s = 1,52$ ,  $b = 0,61$ ,  $x = 12,1$ ; темные точки — результаты измерений, выполненных слева от плоскости симметрии модели, светлые — справа

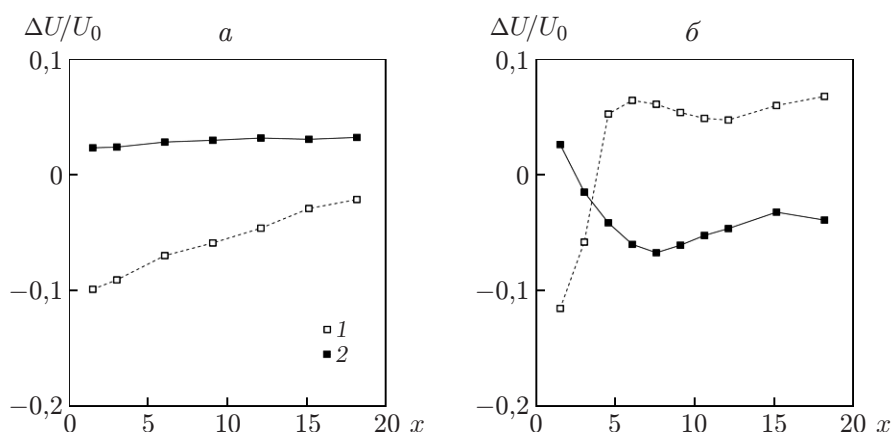


Рис. 5. Максимальные возмущения скорости осредненного по времени течения в следе за элементом неровности (1) и в плоскости симметрии между соседними элементами (2) при  $s = 1,52$ :  
 а —  $b = 0,30$ , б —  $b = 0,61$

осредненного течения (расстояние между кривыми на рис. 5,а) монотонно затухает в направлении потока; во втором (см. рис. 5,б) — наблюдается смена фазы стационарного возмущения по координате  $z$  на противоположную, что свидетельствует о его немодовом усилении с образованием полосчатых структур. Результаты экспериментов и расчетов линейной устойчивости пространственно модулированного отрывного течения показывают, что оно дестабилизируется относительно высокочастотных нестационарных возмущений завихренности, при этом результаты теоретических исследований и экспериментальные данные хорошо согласуются.

Общие закономерности перехода от затухания возмущений течения за уступом поверхности к их немодовому нарастанию установлены в работе [24] при сопоставлении результатов нескольких экспериментов. На рис. 6 показано поведение стационарных возмущений отрывной зоны, генерированных периодическими элементами неровности цилиндри-

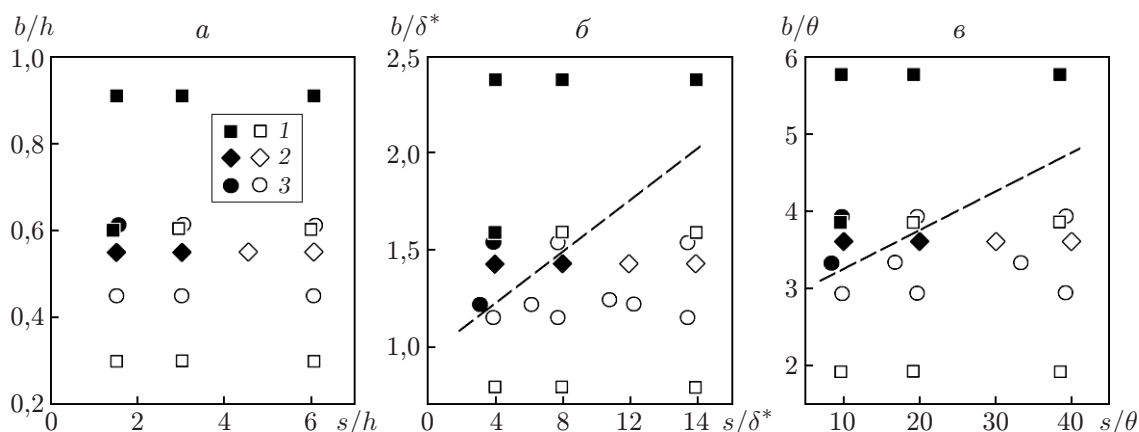


Рис. 6. Развитие стационарных возмущений отрывного течения за двумерным уступом поверхности при  $Re_h = 1060 \div 1350$  в координатах  $b, s$ , нормированных на высоту уступа ( $a$ ), толщину вытеснения ( $b$ ) и толщину потери импульса ( $v$ ): 1 — эксперимент [24], 2 — эксперимент [22], 3 — эксперимент [30, 31]; штриховые линии — граница диапазона, в котором происходит увеличение амплитуд полосчатых структур; темные точки — нарастание возмущений осредненной скорости течения за линией отрыва, светлые — их затухание вдоль потока

ческой [24], прямоугольной [22] и полусферической [30, 31] формы. Результаты показаны в координатах  $b, s$ , нормированных на высоту уступа (см. рис. 6,  $a$ ), толщину вытеснения (см. рис. 6,  $b$ ) и толщину потери импульса (см. рис. 6,  $v$ ) отрывающегося двумерного пограничного слоя. Немодовое усиление стационарных колебаний (см. рис. 6,  $a$ ) проявляется по мере уменьшения их пространственного периода и увеличения начальной амплитуды (высоты элемента неровности). Полученные результаты являются универсальными, поскольку параметры  $b, s$  нормированы на интегральные характеристики предотрывного пограничного слоя. Приблизительное положение границы диапазона, в котором происходит увеличение амплитуды полосчатых структур, показано на рис. 6,  $b, v$  штриховыми линиями. При соответствующих значениях параметров периодически расположенных элементов неровности следует прогнозировать немодовое усиление стационарных искажений поля скорости и развитие неустойчивости отрывного течения относительно высокочастотных нестационарных колебаний.

В экспериментальной работе [25] для генерации пространственной периодичности отрывного течения использовались температурные неоднородности потока, которые, в свою очередь, генерировались элементами Пельтье, встроенными в размещенную на плоской пластине накладку, образующую прямоугольный уступ поверхности (рис. 7). Термоэлектрические модули обеспечивали чередование нагреваемых и охлаждаемых участков поверхности, температура которых стабилизировалась с помощью металлического радиатора с нерабочей стороны пластины. При подключении элементов к источнику электрического питания такая конструкция модели обеспечивала малое (в пределах нескольких минут) время выхода на устойчивый температурный режим. Результаты получены при перепаде температуры на нагреваемых и охлаждаемых участках поверхности в пределах  $\pm 40$  °C, высоте уступа  $h = 2,7$  мм и числе Рейнольдса  $Re = 1020$ .

Результаты экспериментов и расчетов линейной устойчивости отрывного течения показывают, что увеличение колебаний малой амплитуды слабо зависит от пространственной температурной модуляции. Вместе с тем в экспериментах обнаружена корреляция амплитуды нарастающих возмущений скорости с расположением нагреваемых и охлаждаемых участков поверхности модели (рис. 8).

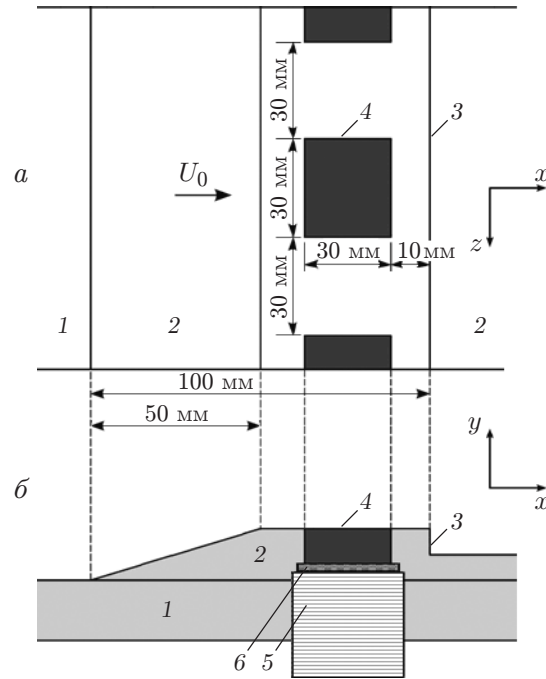


Рис. 7. Фрагмент экспериментальной модели с накладкой и элементами Пельтье:

$a$  — вид сверху,  $b$  — продольное сечение; 1 — пластина, 2 — накладка, 3 — уступ поверхности, 4 — элементы Пельтье, 5 — радиатор, 6 — слой терморасты

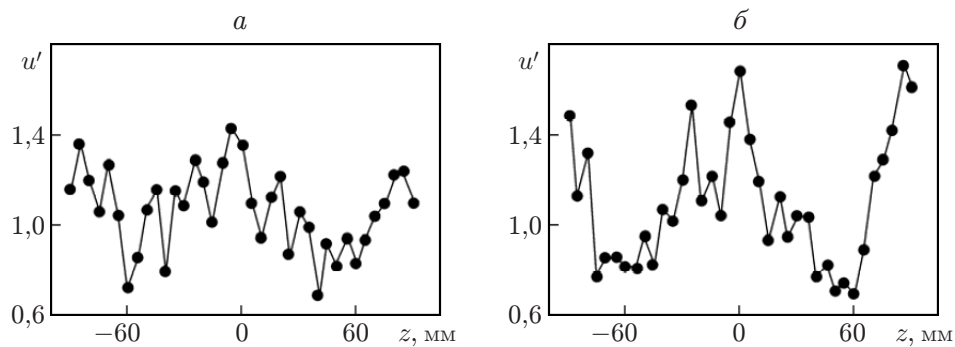


Рис. 8. Трансверсальные распределения амплитуды естественных пульсаций скорости в условиях теплообмена при частотах  $f = 4 \div 10^3$  Гц и различных значениях  $x$ :

$a$  —  $x = 60$  мм,  $b$  —  $x = 80$  мм

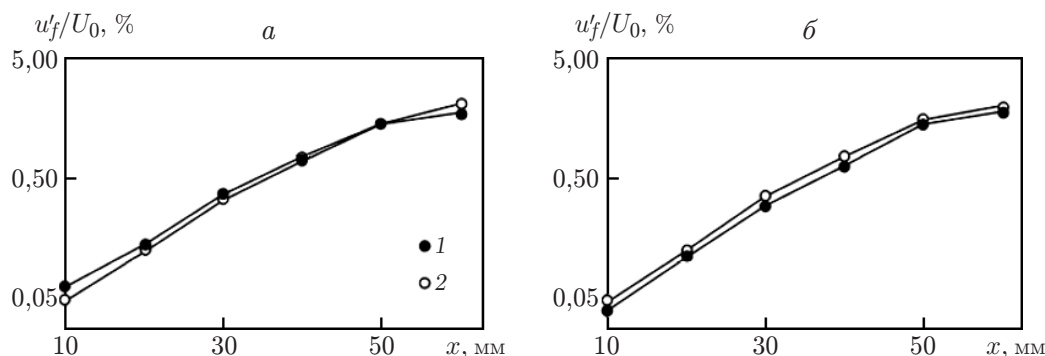


Рис. 9. Зависимость амплитуды колебаний скорости от продольной координаты при частоте  $f = 86,6$  Гц:

$a$  — за нагреваемым участком поверхности ( $z = 0$ ),  $b$  — за охлаждаемым ( $z = -60$  мм);  
 1 — при наличии теплообмена, 2 — в отсутствие температурной неоднородности

Результаты моделирования гармонических во времени колебаний отрывного течения с использованием внешнего акустического источника позволили сделать вывод, что температурная неоднородность оказывает влияние на восприимчивость зоны отрыва к возмущениям внешнего потока (начальной амплитуде осцилляций скорости), которые генерируются на уступе поверхности (рис. 9).

Влияние пространственной периодической модуляции отрывного обтекания тела в продольном по отношению к набегающему потоку направлении на состояние пристенного течения экспериментально исследовалось в работе [32]. Большое количество работ посвящено определению характеристик пограничного слоя на волнистой стенке. В частности, в расчетной работе [33] и экспериментальной работе [34] в условиях волнистости малой амплитуды обнаружена дестабилизация течения. Результаты последующих исследований подтвердили вывод, что пространственно-периодическое изменение формы поверхности оказывает значительное влияние на устойчивость присоединенного пограничного слоя.

В экспериментах [32] амплитуда поверхностных волн выбрана достаточной для возникновения локальных областей отрывного течения. Рассматривалось обтекание волнистой накладкой на плоской пластине, расположенной в потоке под нулевым углом атаки (рис. 10). Близкая к синусоидальной форма поверхности имела пространственный период 31,4 мм и переменную высоту  $h \leq 4$  мм. В этих условиях моделировалось периодическое течение с областями отрыва пограничного слоя во впадинах волнистого участка поверхности. Экспериментальные данные получены при скоростях внешнего потока  $U_0 = 3; 4$  м/с.

О неустойчивости течения можно судить по рис. 11, на котором показано изменение максимального уровня возмущений скорости в направлении потока. Нарастающие колебания выделяются из фоновых пульсаций в начале области измерений. Ниже по потоку распределение амплитуды этих колебаний согласуется с распределением чередующихся участков оторвавшегося и присоединенного пограничного слоя. В отрывных зонах между выступами стенки амплитуда возмущений увеличивается, в окрестности выступов поверхности модели — затухает.

Представляет интерес исследование спектрального состава нарастающих колебаний, в котором преобладают пульсации скорости основной частоты и их гармоники (рис. 12). Появление гармонических спектральных компонент, выделяющихся из фоновых возмущений, свидетельствует о генерации регулярных вихрей в пристенной зоне течения. Согласно данным, приведенным на рис. 12, усиление возмущений в обоих экспериментальных режимах происходит при фиксированном числе Струхала  $Sh = fh/U_0$  аналогично тому,



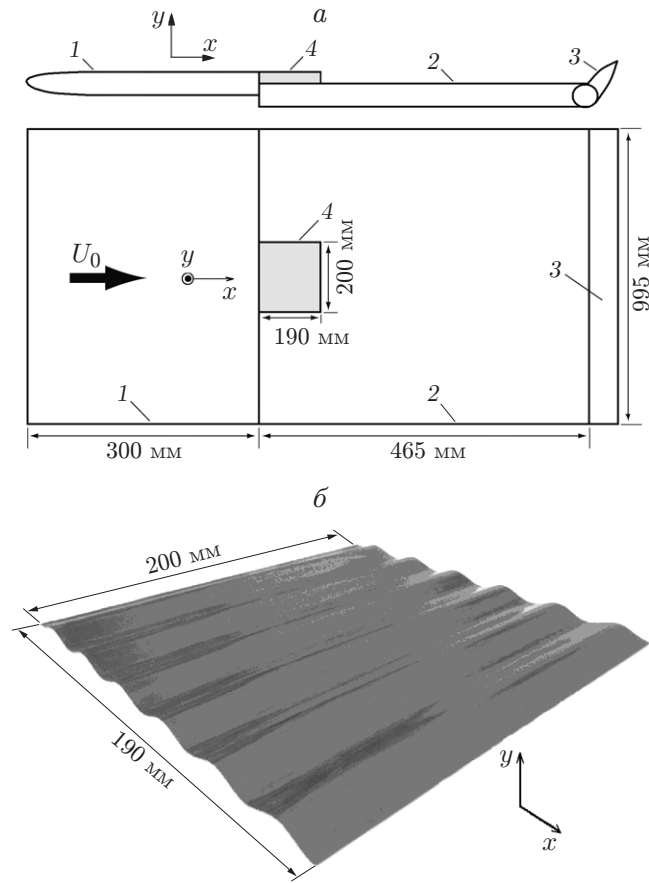


Рис. 10. Схема экспериментальной модели (а) и волнистой наклейки на ее поверхности (б):

1 — передняя пластина, 2 — задняя пластина, 3 — закрылок, 4 — волнистая наклейка

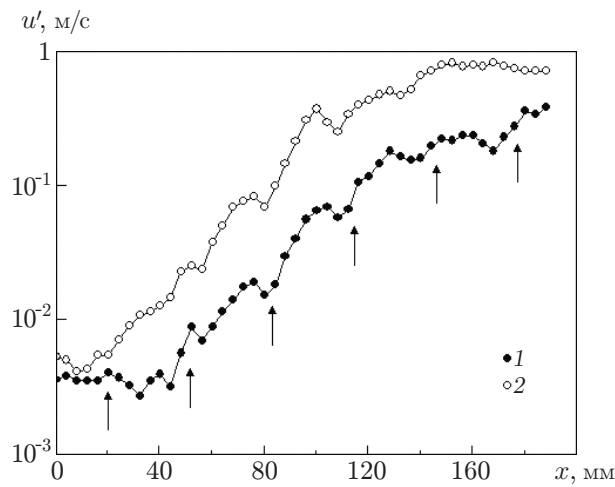


Рис. 11. Зависимость амплитуды возмущений продольной компоненты скорости от координаты  $x$  при частотах  $f \leq 5 \cdot 10^3$  Гц и различных значениях  $U_0$ :

1 —  $U_0 = 3$  м/с, 2 —  $U_0 = 4$  м/с; стрелки — положение выступов волнистого участка поверхности

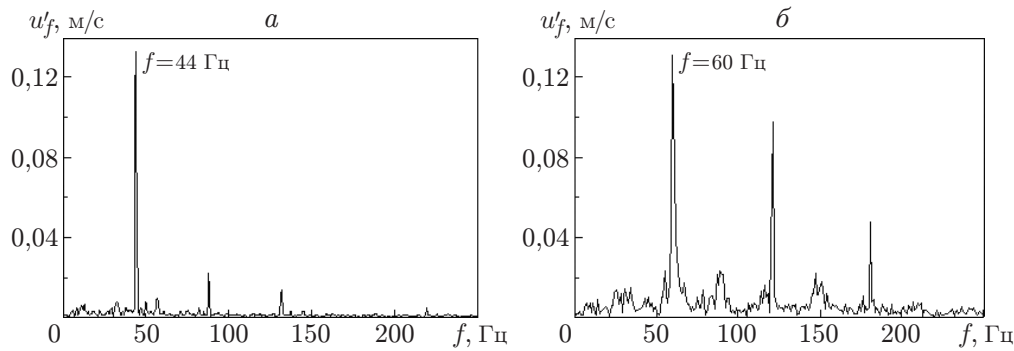


Рис. 12. Спектры пульсаций продольной компоненты скорости, измеренные при максимальной амплитуде возмущений и различных значениях  $U_0$ ,  $x$ :  
 а —  $U_0 = 3$  м/с,  $x = 144$  мм, б —  $U_0 = 4$  м/с,  $x = 112$  мм

как происходит развитие вихревого движения при возбуждении автоколебаний в следе за плохообтекаемым телом. Результаты экспериментальной работы [32] также показывают, что внешнее гармоническое акустическое возбуждение течения в частотном диапазоне его неустойчивости подавляет образование когерентных вихрей.

**3. Модуляция отрывного течения во времени.** Как указано выше, нестационарность отрывного течения может быть обусловлена различными причинами, включая генерацию низкочастотных колебаний, которые оказывают влияние на нарастающие возмущения скорости в частотном диапазоне неустойчивости сдвигового слоя, воздействуя на его переход в турбулентное состояние. Взаимодействие низкочастотных возмущений отрывной зоны за уступом поверхности с высокочастотными волнами неустойчивости исследовалось в экспериментальной работе [35].

Тестовая модель представляла собой две пластины, образующие прямоугольный уступ обтекаемой потоком поверхности (рис. 13) и расположенные под нулевым углом атаки

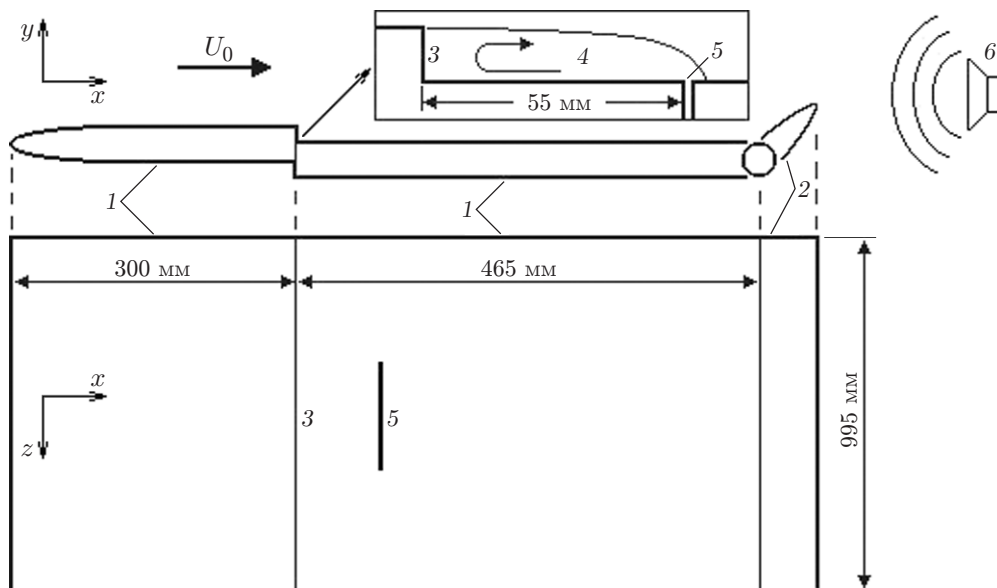


Рис. 13. Схема экспериментальной модели с поперечной щелью:

1 — пластины, 2 — закрылок, 3 — уступ поверхности, 4 — зона отрыва пограничного слоя, 5 — поперечная щель на поверхности задней пластины, 6 — динамический громкоговоритель

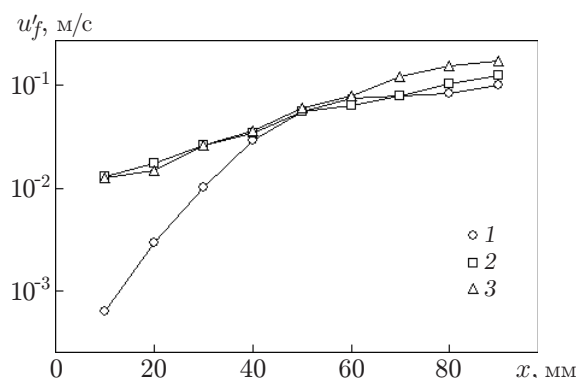


Рис. 14. Зависимость от координаты  $x$  максимальной амплитуды волн неустойчивости в исходном течении при частоте  $f = 270$  Гц (1) и при модуляции зоны отрыва при частотах  $f = 5$  Гц (2) и  $f = 10$  Гц (3)

к набегающему потоку. Низкочастотные возмущения отрывной зоны порождались периодическим вдувом (отсосом) воздуха в пристенную зону течения через поперечную щель на поверхности модели. Нарастающие за линией отрыва высокочастотные волны неустойчивости генерировались звуковыми колебаниями динамического громкоговорителя, установленного в рабочей части аэродинамической трубы. Высота уступа составляла  $h = 2,8$  мм, скорость внешнего потока над уступом равна  $U_0 = 8,7$  м/с, число Рейнольдса  $Re_h = 1570$ .

Отрывное течение модулировалось во времени на предельно низких частотах колебаний, которые стабильно генерировались через поперечную щель на поверхности модели. Влияние нестационарности течения на его устойчивость определялось при акустическом возбуждении коротковолновых возмущений оторвавшегося пограничного слоя, частота которых выбрана вблизи спектрального максимума неустойчивости отрывной зоны. Пространственное нарастание колебаний в исходном течении сравнивалось с изменением их амплитуды в направлении потока при низкочастотном возбуждении зоны отрыва (рис. 14). При наличии периодической модуляции течения амплитуда волн неустойчивости на начальном участке отрывной области значительно увеличивается.

В работе [35] экспериментально определено влияние низкочастотной нестационарности области отрыва ламинарного потока на возмущения завихренности оторвавшегося пограничного слоя. “Медленные” колебания отрывной зоны приводят к увеличению осредненной по времени амплитуды высокочастотных пульсаций скорости, развитие которых определяет переход отрывного течения в турбулентное состояние. Таким образом, показано, что низкочастотная модуляция зоны отрыва оказывает дестабилизирующее влияние на пристенное течение.

**Заключение.** Рассмотрены результаты работ, дающие представление о неустойчивости течения с отрывом ламинарного пограничного слоя, вызванной его пространственно-временной периодической модуляцией. Показано, что немодовое усиление стационарных возмущений отрывной зоны стимулирует нарастание высокочастотных колебаний течения, увеличение его восприимчивости к пульсациям внешнего потока в условиях температурной неоднородности. Обнаружены генерация когерентных вихрей над волнистой поверхностью с локальными областями оторвавшегося пограничного слоя, возрастание неустойчивости отрывного течения при его низкочастотном возбуждении. Результаты исследований могут быть использованы при исследовании особенностей формирования локальных отрывных течений в “сложных” условиях, отличающихся от условий отрыва пространственно однородного пограничного слоя в стационарном потоке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Ward J. W.** The behaviour and effects of laminar separation bubbles on airfoils in incompressible flow // *J. Roy. Aeronaut. Soc.* 1963. V. 67. P. 783–790.
2. **Власов Е. В., Гиневский А. С., Каравосов Р. К., Франкфурт М. О.** Пристеночные пульсации давления в зоне отрыва за двумерными препятствиями // *Тр. Центр. аэрогидродинам. ин-та.* 1982. Вып. 2137. С. 3–22.
3. **Eaton J. K., Johnston J. P.** A review of research on subsonic turbulent flow reattachment // *AIAA J.* 1981. V. 19. P. 1093–1100.
4. **Gaster M.** The structure and behavior of separation bubbles: Rep. / *Aeronaut. Res. Council.* N 3595. L., 1967.
5. **O’Meara M. M., Mueller T. J.** Laminar separation bubble characteristics on an airfoil at low Reynolds numbers // *AIAA J.* 1987. V. 25. P. 1033–1041.
6. **Sinha S. N., Gupta A. K., Oberai M. M.** Laminar separating flow over backsteps and cavities. Pt 1. Backsteps // *AIAA J.* 1981. V. 19. P. 1527–1530.
7. **Квон О. К., Плетчер Р. Ш.** Расчет несжимаемых оторвавшихся пограничных слоев с учетом вязко-невязкого взаимодействия // *Теорет. основы инж. расчетов.* 1979. № 4. С. 171–180.
8. **Briley W. R., McDonald H.** Numerical prediction of incompressible separation bubbles // *J. Fluid Mech.* 1975. V. 69. P. 631–656.
9. **Choi D. H., Kang D. J.** Calculation of separation bubbles using a partially parabolized Navier — Stokes procedure // *AIAA J.* 1991. V. 29. P. 1266–1272.
10. **Crimi P., Reeves B. L.** Analysis of leading-edge separation bubbles on airfoils // *AIAA J.* 1976. V. 14. P. 1548–1555.
11. **Davis R. L., Carter J. E., Reshotko E.** Analysis of transitional separation bubbles on infinite swept wings // *AIAA J.* 1987. V. 25. P. 421–428.
12. **Dini P., Maughmer M. D.** A locally interactive laminar separation bubble model. University Park (Pennsylvania), 1990. (Paper / AIAA; N 90-0570).
13. **Dini P., Selig M. S., Maughmer M. D.** Simplified linear stability transition prediction method for separated boundary layers // *AIAA J.* 1992. V. 30. P. 1953–1961.
14. **Drela M., Giles M. B.** Viscous-inviscid analysis of transonic and low Reynolds number airfoils // *AIAA J.* 1987. V. 25. P. 1347–1355.
15. **Van Ingen J. L.** On the calculation of laminar separation bubbles in two-dimensional incompressible flow // *AGARD Conf. Proc.* 1975. N 168. С. 11.1–11.16.
16. **Van Ingen J. L.** Research on laminar separation bubbles at Delft University of Technology // *Separated flows and jets* / Ed. by V. V. Kozlov, A. V. Dovgal. Delft: Springer, 1991. P. 537–556.
17. **Briley W. R.** A numerical study of laminar separation bubble using the Navier — Stokes equations // *J. Fluid Mech.* 1971. V. 47. P. 713–736.
18. **Pauley L. L., Moin P., Reynolds W. C.** The structure of two-dimensional separation // *J. Fluid Mech.* 1990. V. 220. P. 397–411.
19. **Tafti D. K., Vanka S. P.** A numerical study of flow separation and reattachment on a blunt plate // *Phys. Fluids A.* 1991. V. 3. P. 1749–1759.
20. **Dovgal A. V., Kozlov V. V., Michalke A.** Laminar boundary-layer separation: instability and associated phenomena // *Progr. Aerospace Sci.* 1994. V. 30. P. 61–94.
21. **Boiko A. V.** Physics of transitional shear flows / A. V. Boiko, A. V. Dovgal, G. R. Grek, V. V. Kozlov. Dordrecht: Springer, 2012.
22. **Boiko A. V., Dovgal A. V., Hein S.** Control of a laminar separating boundary layer by induced stationary perturbations // *Europ. J. Mech. B. Fluids.* 2008. V. 27, N 4. P. 466–476.

23. **Boiko A. V., Dovgal A. V., Sorokin A. M.** Instability of a backward-facing step flow modified by stationary streaky structures // *Phys. Fluids*. 2012. V. 24. P. 104104-1–104104-11.
24. **Бойко А. В., Довгаль А. В., Сорокин А. М.** Немодовое нарастание стационарных возмущений ламинарного течения в зоне отрыва пограничного слоя // *Теплофизика и аэромеханика*. 2011. Т. 18, № 1. С. 109–115.
25. **Бойко А. В., Довгаль А. В., Сорокин А. М.** Отрывное течение за уступом поверхности, подверженное стационарному температурному возмущению // *Теплофизика и аэромеханика*. 2015. Т. 22, № 6. С. 717–728.
26. **Landahl M. T.** A note on an algebraic instability of inviscid parallel shear flows // *J. Fluid Mech.* 1980. V. 98. P. 243–251.
27. **Reshotko E.** Transient growth: A factor in bypass transition // *Phys. Fluids*. 2001. V. 13, N 5. P. 1067–1075.
28. **Schmid P. J.** Stability and transition in shear flows / P. J. Schmid, D. S. Henningson. N. Y.: Springer, 2001.
29. **Schlatter P., Brandt L., de Lange H. C., Henningson D. S.** On streak breakdown in bypass transition // *Phys. Fluids*. 2008. V. 20. P. 101505-1–101505-15.
30. **Boiko A. V., Dovgal A. V., Sorokin A. M.** Secondary instability of a laminar separation bubble perturbed by stationary streamwise structures // *Proc. of the 14th Intern. conf. on the methods of aerophysical research, Novosibirsk, June 30 — July 6, 2008*. Novosibirsk: Parallel, 2008. P. 2.1–2.5.
31. **Boiko A. V., Dovgal A. V., Hein S., et al.** Particle image velocimetry of streaky structures in a laminar separation bubble: Rep. / *Inst. Aerodynamik und Stromungstechnik. N DLR IB 224-2008 A 20*. Göttingen, 2008.
32. **Бойко А. В., Довгаль А. В., Сорокин А. М.** Устойчивость пространственно-периодического течения с отрывом ламинарного пограничного слоя // *Теплофизика и аэромеханика*. 2019. Т. 26, № 6. С. 889–896.
33. **Левченко В. Я., Соловьев А. С.** Устойчивость пограничного слоя на волнистой поверхности // *Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа*. 1972. № 6. С. 11–16.
34. **Качанов Ю. С., Козлов В. В., Левченко В. Я.** Экспериментальное исследование устойчивости ламинарного пограничного слоя на волнистой поверхности // *Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук*. 1974. № 3. С. 3–6.
35. **Бойко А. В., Довгаль А. В., Сорокин А. М.** Устойчивость периодического во времени течения с отрывом ламинарного пограничного слоя // *Теплофизика и аэромеханика*. 2018. Т. 25, № 5. С. 693–699.

*Поступила в редакцию 4/III 2021 г.,  
после доработки — 4/III 2021 г.  
Принята к публикации 29/III 2021 г.*