

УДК 532.526

Неустойчивость отрывного течения за двумерными элементами неровности поверхности в низкоскоростном воздушном потоке (обзор)*

А.В. Бойко^{1,2}, А.В. Довгаль¹, В.В. Козлов¹

¹Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

²Тюменский государственный университет

E-mail: boiko@itam.nsc.ru, dovgal@itam.nsc.ru, kozlov@itam.nsc.ru

В результате многолетних исследований обтекания двумерных элементов неровности поверхности дозвуковым воздушным потоком сформированы физические модели их влияния на переход к турбулентности в пограничном слое. В основу моделей заложены свойства устойчивости пристенного течения в окрестности его геометрических неоднородностей. Механизмы дестабилизации пограничного слоя элементами неровности, выявленные в рамках традиционного анализа малых колебаний слоев сдвига скорости и с применением развитых в последнее время подходов к рассмотрению локальной/глобальной модальной/немодальной устойчивости течения, обсуждаются в настоящем обзоре. При его подготовке предпочтение авторов было отдано тому, чтобы в сжатом виде обозначить основные пути турбулизации течения, избегая многочисленных деталей, которые приводятся в оригинальных работах.

Ключевые слова: неровность обтекаемой поверхностью потоком, отрыв пограничного слоя, гидродинамическая устойчивость, переход к турбулентности.

Введение

Общее представление о движении тел в жидкости/газе подсказывает, что неровности обтекаемой поверхностью способствуют переходу пограничного слоя в турбулентное состояние. Подтверждением этому служат обширные результаты исследований отрывного течения в окрестности локальных геометрических неоднородностей поверхности, включая ее двумерные выступы, прямые и обратные ступеньки.

Ранние работы по этой тематике ограничивались поиском эмпирических корреляций положения перехода к турбулентности с размерами элементов неровности и основными параметрами течения. В итоге были предложены соотношения для допустимой высоты шероховатости в качестве критерия ее влияния на турбулизацию пограничного слоя, ссылки на литературные источники приведены в монографии (Шлихтинг, 1969). Более поздние экспериментальные исследования были сфокусированы на средних во времени и пульсационных характеристиках отрывного обтекания элементов неровности; результаты обсуждались авторами оригинальных работ, например (Sinha et al., 1981; Власов и др., 1982; Gibbings et al., 1986), а также были представлены в обзорной статье (Eaton, Johnston, 1981). Обнаруженные

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-19-10330).

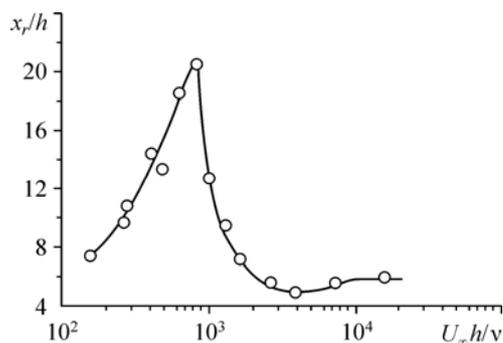


Рис. 1. Протяженность зоны отрыва пограничного слоя за прямоугольным уступом поверхности в зависимости от числа Рейнольдса (из работы Sinha et al., 1981).

при этом эффекты неустойчивости в задачах внешнего обтекания тел оказались во многом схожи с теми, которые наблюдаются во внутренних течениях. Многочисленные исследования выполнены в каналах с геометрическими неоднородностями; в числе работ последнего времени — эксперименты (Молочников и др.,

2008; Душина и др., 2010; Душина и др., 2012), результаты которых дают детальное представление о пространственно-временной структуре течения при отрыве ламинарного потока за выступами на стенке канала. Современное понимание того, каким образом неоднородности поверхности стимулируют процесс ламинарно-турбулентного перехода, сформировалось в результате изучения самого по себе процесса турбулизации экспериментальными, теоретическими методами и прямым численным моделированием.

В зависимости от числа Рейнольдса выделяются ламинарный, переходный и турбулентный режимы отрывного обтекания двумерных элементов неоднородности поверхности. Первый из них наблюдается при сравнительно низкой скорости внешнего потока и малой высоте элемента неровности, когда переход к турбулентности завершается за пределами зоны отрыва и ее длина растет с числом Рейнольдса (рис. 1). В экспериментах (Sinha et al., 1981), результаты которых воспроизведены на этом рисунке, ламинарное отрывное течение за прямоугольным уступом поверхности реализовано до $Re_h = U_\infty h/\nu \sim 10^3$ (здесь и далее h — высота элемента неровности). По мере увеличения числа Рейнольдса точка перехода движется вверх по потоку, оказываясь в пределах области отрыва, которая формируется в переходном режиме течения. В этих условиях протяженность отрывной зоны сокращается до тех пор, пока турбулизация течения не происходит в непосредственной близости элемента неоднородности с возникновением отрыва турбулентного пограничного слоя (на рис. 1 этому соответствует $Re_h \sim 10^4$). Предметом дальнейшего обсуждения являются механизмы влияния элементов неровности на состояние пограничного слоя в ламинарном и переходном режимах их отрывного обтекания; отрыв турбулентного течения — отдельная область исследований.

Механизмы турбулизации

Для описания процесса перехода к турбулентности за элементами неровности поверхности используются различные теоретические построения и физические модели явления, применимость которых зависит от условий отрыва пограничного слоя. При низком уровне фоновых возмущений надежные результаты дает классический анализ устойчивости течения по отношению к элементарным волнам. Зона отрыва за элементом неоднородности, подобно конвективно неустойчивым параллельным и квазипараллельным слоям сдвига скорости, рассматривается в качестве усилителя вихревых возмущений, возбуждаемых в ней внешними источниками и нарастающих по мере распространения вниз по потоку. Альтернативным является механизм неустойчивости, обусловленный самовозбуждением отрывных областей, предсказанным результатами теории и получившим экспериментальное обоснование. Помимо этого, возмущения зоны отрыва могут быть подвержены немодовому нарастанию, выходящему за рамки традиционного анализа устойчивости сдвиговых течений.

Конвективная неустойчивость преобладает в областях отрыва за элементами неровности сравнительно малой высоты при максимальной скорости возвратного течения вблизи стенки в пределах нескольких процентов скорости внешнего потока. Внешние по отношению

к зоне отрыва возмущения генерируют волны неустойчивости оторвавшегося слоя, пространственное усиление которых приводит к ламинарно-турбулентному переходу. В этом случае, следуя традиционному подходу к изучению конвективно-неустойчивых сдвиговых течений, выделяются разные стороны проблемы.

Процесс турбулизации отрывной зоны начинается с возбуждения в ней нарастающих возмущений завихренности. Известно, что генерация колебаний пограничного слоя (волн Толлмина–Шлихтинга) эффективна при взаимодействии нестационарных возмущений потока с локальными геометрическими неоднородностями течения, см. обзорную работу (Nishioka, Morkovin, 1986) и результаты теоретических исследований (Рубан, 1984; Goldstein, 1985; Bodonyi et al., 1989). Экспериментально порождение звуком волн Толлмина–Шлихтинга на плоской пластине за элементом неровности малой высоты, на порядки величины меньше местной толщины пограничного слоя, было обнаружено в работе (Айзин, Поляков, 1979). Таким образом, локальные неоднородности поверхности, вызывающие отрыв потока, одновременно являются источниками его нарастающих колебаний. Генерацию вихревых возмущений отрывного течения на прямоугольной ступеньке поверхности плоской пластины акустическими колебаниями потока иллюстрирует рис. 2. Перед точкой отрыва ($x < 0$) амплитуда пульсаций скорости u' , измеренная в максимуме возмущений поперек вязкого пристенного слоя и отнесенная к средней скорости внешнего течения U_0 , примерно постоянна и определяется звуковой волной; за ступенькой ($x > 0$) эта амплитуда определяется суперпозицией длинноволновых акустических колебаний и возбужденных ими коротковолновых возмущений завихренности, подверженных пространственному усилению.

В общем случае начальная амплитуда волн неустойчивости зависит от природы внешних возмущений, их интенсивности, спектрального состава и параметров среднего течения на участке генерации, включая его геометрические характеристики. В частности, сопоставление двух канонических конфигураций — прямой и обратной прямоугольных ступенек — показывает, что вторая из них, при прочих равных условиях, более восприимчива к акустическим колебаниям потока и в этом отношении сравнительно неблагоприятна для поддержания ламинарного обтекания тела (Бойко и др, 1990а).

Возбужденные на неоднородности поверхности вихревые возмущения обладают относительно большими скоростями пространственного нарастания. В числе первых работ, результаты которых показали дестабилизацию пограничного слоя за элементами неровности, были расчеты (Герценштейн, 1966) и эксперименты (Klebanoff, Tidstrom, 1972). С позиций классической линейной теории устойчивости сдвиговых течений это явление объясняется формированием участка пристенного течения с перегибными профилями средней скорости. При этом анализ устойчивости модельных профилей скорости (Taghavi, Wazzan, 1974; Michalke, 1990) демонстрирует возрастание инкрементов колебаний с увеличением расстояния от точки перегиба до стенки. Таким образом, по мере возрастания высоты элемента неровности (соответственно и толщины зоны отрыва) усиливается дестабилизация течения (Nayfeh et al., 1990) с развитием коротковолновой невязкой неустойчивости (Smith, Bodonyi, 1985).

Представление о степени влияния двумерных неоднородностей поверхности на развитие малых возмущений дают экспериментальные результаты для отрывных течений на плоской

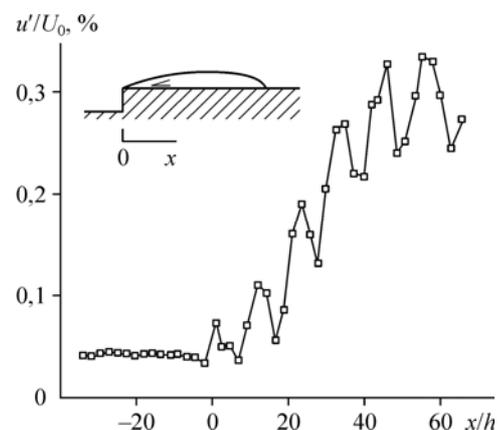


Рис. 2. Среднеквадратичная амплитуда возмущений продольной компоненты скорости в окрестности ступеньки на частоте внешнего гармонического звукового воздействия при $Re_h = 880$ (из работы Бойко и др, 1990а).

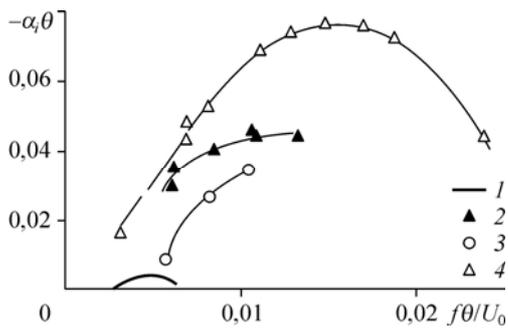


Рис. 3. Инкременты колебаний в пограничном слое Блазиуса при $Re_{\delta^*} = 1320$ (1) (Левченко и др., 1975), в областях отрыва за обратными ступеньками при $Re_h = 880$ (2) и 360 (3) (Бойко и др., 1990а), за прямоугольным выступом поверхности при $Re_h = 730$ (4) (Бойко и др., 1990б).

пластине (Бойко и др., 1990а; Бойко и др., 1990б). На рис. 3 показана скорость пространственного усиления гармонических колебаний $-\alpha_i$ в зависимости от их частоты f при нормировке данных на толщину потери импульса θ . Отрыв потока за элементами неровности приводит к многократному увеличению инкрементов волн неустойчивости и расширению их спектрального диапазона.

Развитие конвективных вихревых возмущений малых амплитуд в областях отрыва за двумерными неоднородностями поверхности хорошо описывается результатами анализа устойчивости локальных профилей скорости в сравнении с данными эксперимента (Michalke, 1991; Masad, Nayfeh, 1992; Masad, Nayfeh, 1993) и прямого численного моделирования (Bestek et al., 1993). Для предсказания перехода к турбулентности за элементами неровности линейная теория устойчивости квазипараллельных сдвиговых течений была использована в расчетах (Nayfeh et al., 1988; Sebeci, Egan, 1989; Masad, Iyer, 1994; Masad, Malik, 1994).

Дополнительным фактором, влияющим на турбулилизацию оторвавшегося слоя, является его поперечная кривизна. Расчеты устойчивости профилей скорости, моделирующих среднее течение в осесимметричной зоне отрыва, были выполнены в работе (Michalke et al., 1995). Результаты показали, что в целом осевая симметрия стабилизирует течение, вызывая сокращение числа нарастающих спиральных мод колебаний. Теоретический вывод (Michalke et al., 1995) о стабилизирующей роли осевой симметрии относительно осесимметричной моды колебаний получил подтверждение в экспериментах (Dovgal et al., 1995), где определялись характеристики малых возмущений в зоне отрыва за уступом поверхности тела вращения, расположенного продольно набегающему потоку.

Самовозбуждение областей отрыва пограничного слоя в различных геометрических условиях, как правило, выражается в развитии крупномасштабного квазипериодического вихревого движения, которое приписывают специфической неустойчивости зоны отрыва к сходу вихря («shedding type instability») (Sigurdson, Roshko, 1988) или появлению моды колебаний, характерной для следа за плохообтекаемыми телами («wake mode of oscillations») (Hudy et al., 2007). В сущности, такое нестационарное поведение отрывной зоны отличается от случая усиления в ней коротковолновых конвективных возмущений оторвавшегося слоя тем, что оно регулируется не локальными, а глобальными свойствами течения, отражая его внутреннюю динамику.

Авторы ряда теоретических работ связывают осцилляции отрывных областей с абсолютной неустойчивостью профилей скорости, которая появляется при возрастании возвратного течения вблизи стенки (Gaster, 1992) по разным оценкам до 15–30 % скорости внешнего потока (Alam, Sandham, 2000; Hammond, Redekopp, 1998). Возникновение абсолютной неустойчивости на протяженном участке течения влечет за собой развитие глобальных мод колебаний. В итоге генерируемые зоной отрыва возмущения преобладают над конвективными волнами неустойчивости оторвавшегося слоя. Нестационарность течения за уступом поверхности в рамках этой модели трактуется авторами расчетных (Wee et al., 2004) и экспериментальных (Hudy et al., 2007) исследований. Результаты анализа глобальных стационарных и нестационарных мод колебаний в областях отрыва потока за двумерными неровностями обтекаемой поверхности представлены в работах (Marquillie, Ehrenstein, 2003; Gallaire et al., 2007; Ehrenstein, Gallaire, 2008). Тематически близкими являются расчетные

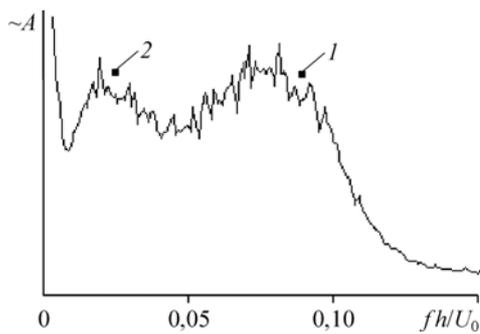


Рис. 4. Пакеты волн неустойчивости оторвавшегося пограничного слоя (1) и длинноволновых осцилляций зоны отрыва (2) за прямоугольным уступом поверхности при $Re_h = 1700$ (Довгаль, Сорокин, 2001).

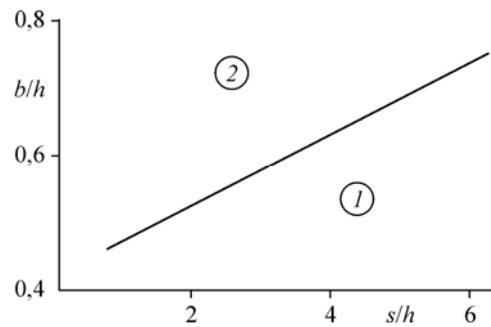


Рис. 5. Диапазоны затухания (1) и немодового нарастания (2) стационарных возмущений отрывного течения за прямоугольным уступом поверхности при $Re_h = 1060-1350$ (Бойко и др., 2011).

данные для отрыва потока на плоской пластине под действием внешнего градиента давления (Theofilis et al., 2000) и за уступами на стенке канала (Barkley et al., 2002; Kaiktsis, Monkewitz, 2003; Marquet et al., 2008; Lanzerstorfer, Kuhlmann, 2012). В частности, результаты анализа (Ehrenstein, Gallaire, 2008) дают возможное объяснение низкочастотному движению (flapping), присущему областям отрыва потока в различных конфигурациях течения.

В условиях самовозбуждения отрывного течения его пульсационная составляющая определяется сочетанием и возможной конкуренцией генерируемых зоной отрыва осцилляций с конвективными вихревыми возмущениями сдвигового слоя. Обтекание прямоугольного уступа поверхности в таком режиме неустойчивости было исследовано в экспериментах (Довгаль, Сорокин, 2001; Довгаль, Сорокин, 2002), результаты которых показали качественное различие высоко- и низкочастотных возмущений, выделяющихся в спектре пульсаций скорости за точкой отрыва (рис. 4).

Немодовое усиление возмущений сдвигового течения — это проявление неустойчивости, связанное с тем, что моды колебаний, образующие эти возмущения, неортогональны. В силу неортогональности, энергия стационарных и нестационарных деформаций течения может испытывать временное (transient) нарастание при затухании волн, которые их составляют и описываются решениями теории устойчивости. Эта сторона ламинарно-турбулентного перехода подробно обсуждается в монографии (Schmid, Henningson, 2001), многочисленные литературные ссылки на оригинальные источники приведены в работах (Reshotko, 2001; Schlatter et al., 2008).

Эффекты временного нарастания возмущений в областях отрыва потока за геометрическими неоднородностями поверхности — предмет теоретических исследований последнего времени (Ehrenstein, Gallaire, 2008; Blackburn et al., 2008; Marquet et al., 2009). Экспериментально немодовое усиление возмущений ламинарного течения в условиях отрыва пограничного слоя изучалось в работах (Voiko et al., 2008; Бойко и др., 2011; Voiko et al., 2012), где стационарные искажения поля скорости за прямоугольным уступом поверхности порождались трехмерными элементами неровности, расположенными периодически вдоль линии отрыва. При сопоставлении результатов, полученных для систем элементов в их различной пространственной компоновке, были определены общие закономерности перехода от затухания стационарных возмущений к их временному нарастанию. Область немодового усиления в исследованном диапазоне параметров b и s , где b — высота трехмерных элементов неоднородности, генерирующих возмущения зоны отрыва, s — их пространственный период, показана на рис. 5. Кроме того, результаты исследований (Voiko et al., 2008; Voiko et al., 2012) привели к выводу о дестабилизации отрывного течения, модулированного его стационарными неоднородностями, относительно волновых возмущений, что согласуется с имеющимися представлениями об эффектах немодового нарастания в процессе турбулизации пограничного слоя.

Заключение

В настоящем обзоре изложено общее понимание его авторами текущего состояния исследований устойчивости отрывных течений в окрестности двумерных неоднородностей поверхности в дозвуковом воздушном потоке. Большая часть экспериментальных и расчетных результатов, опубликованных по этому вопросу в научной литературе, интерпретируется, следуя традиционным представлениям о ламинарно-турбулентном переходе в слоях сдвига скорости. К сравнительно новым направлениям работы относится анализ глобальной динамики областей отрыва и немодового усиления их возмущений. Рассмотренные выше эффекты неустойчивости свойственны в той или иной мере отрыву ламинарного потока в различных геометрических условиях: на крыловых профилях и крыльях конечного удлинения, на плоской поверхности при неблагоприятном градиенте давления во внешнем потоке, в диффузорах, на передних кромках и в кормовой части плохообтекаемых тел. Результаты многочисленных работ по этой тематике выходят за рамки настоящей статьи. Их упоминание, наряду с подробностями, относящимися к вышеизложенному материалу, можно найти в публикациях из списка цитируемой литературы.

Список литературы

- Айзин Л.Б., Поляков Н.Ф. 1979. Генерация волн Толлмина–Шлихтинга звуком на отдельной неровности поверхности, обтекаемой потоком. Новосибирск. № 17. 22 с. (Препринт / ИТПМ СО РАН).
- Бойко А.В., Довгаль А.В., Козлов В.В., Щербаков В.А. 1990а. Неустойчивость и восприимчивость пограничного слоя в окрестности двумерных неоднородностей поверхности // Изв. СО АН СССР. Серия техн. наук. Вып. 1. С. 50–56.
- Бойко А.В., Довгаль А.В., Козлов В.В., Щербаков В.А. 1990б. Неустойчивость течения в зоне отрыва ламинарного пограничного слоя на малой неровности поверхности // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. № 1. С. 16–22.
- Бойко А.В., Довгаль А.В., Сорокин А.М. 2011. Немодовое нарастание стационарных возмущений ламинарного течения в зоне отрыва пограничного слоя // Теплофизика и аэромеханика. Т. 18. № 1. С. 109–115.
- Власов Е.В., Гиневский А.С., Каравосов Р.К., Франкфурт М.О. 1982. Пристеночные пульсации давления в зоне отрыва за двумерными препятствиями // Тр. ЦАГИ. Вып. 2137. С. 3–22.
- Герценштейн С.Я. 1966. О влиянии единичной шероховатости на возникновение турбулентности // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. № 2. С. 163–166.
- Довгаль А.В., Сорокин А.М. 2001. Неустойчивость течения в зоне отрыва ламинарного пограничного слоя к сходу периодических вихрей // Теплофизика и аэромеханика. Т. 8. № 2. С. 189–197.
- Довгаль А.В., Сорокин А.М. 2002. Экспериментальное моделирование периодического вихреобразования при отрыве течения за уступом поверхности // Теплофизика и аэромеханика. Т. 9. № 2. С. 193–200.
- Душина О.А., Молочников В.М., Михеев Н.И., Паерелий А.А. 2012. Эволюция кинематической структуры потока за поперечным выступом в канале на переходных режимах течения // Теплофизика и аэромеханика. Т. 19. № 2. С. 235–243.
- Душина О.А., Молочников В.М., Паерелий А.А., Михеев Н.И., Леманов В.В. 2010. Структура потока за выступом в канале в условиях ламинарно-турбулентного перехода // Теплофизика и аэромеханика. Т. 17. № 3. С. 349–361.
- Левченко В.Я., Володин А.Г., Гапонов С.А. 1975. Характеристики устойчивости пограничных слоев. Новосибирск: Наука. 313 с.
- Молочников В.М., Михеев Н.И., Паерелий А.А., Хайриасов К.Р. 2008. Отрыв потока за выступом в канале при ламинарном режиме течения // Теплофизика и аэромеханика. Т. 15. № 4. С. 611–621.
- Рубан А.И. 1984. О генерации волн Толлмина–Шлихтинга звуком // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. № 5. С. 44–52.
- Шлихтинг Г. 1969. Теория пограничного слоя. М.: Наука. 742 с.
- Alam M., Sandham N.D. Direct numerical simulation of «short» laminar separation bubbles with turbulent reattachment // J. Fluid Mech. 2000. Vol. 410. P. 1–28.
- Barkley D., Gomes M. G.M., Henderson R.D. 2002. Three-dimensional instability in flow over a backward facing step // J. Fluid Mech. Vol. 473. P. 167–190.
- Bestek H., Gruber K., Fasel H. 1993. Direct numerical simulation of unsteady separated boundary-layer flows over smooth backward-facing steps // Physics of Separated Flows — Numerical, Experimental, and Theoretical Aspects / Ed. K. Gersten. Braunschweig: Vieweg. Vol. 40. P. 73–80.
- Blackburn H.M., Barkley D., Sherwin S. J. 2008. Convective instability and transient growth in flow over a backward-facing step // J. Fluid Mech. Vol. 603. P. 271–304.

- Bodonyi R.J., Welch W.J.C., Duck P.W., Tadjfar M.** 1989. A numerical study of the interaction between unsteady free-stream disturbances and localized variations in surface geometry // *J. Fluid Mech.* Vol. 209. P. 285–308.
- Boiko A.V., Dovgal A.V., Hein S.** 2008. Control of a laminar separating boundary layer by induced stationary perturbations // *Eur. J. Mech. B/Fluids.* Vol. 27. No. 4. P. 466–476.
- Boiko A.V., Dovgal A.V., Sorokin A.M.** 2012. Instability of a backward-facing step flow modified by stationary streaky structures // *Phys. Fluids.* Vol. 24. P. 104104-1–104104-11.
- Cebeci T., Egan D.A.** 1989. Prediction of transition due to isolated roughness // *AIAA J.* Vol. 27. P. 870–875.
- Dovgal A.V., Kozlov V.V., Michalke A.** 1995. Contribution to the instability of laminar separating flows along axisymmetric bodies. Part II: Experiment and comparison with theory // *Eur. J. Mech. B/Fluids.* Vol. 14. No. 3. P. 351–365.
- Eaton J.K., Johnston J.P.** 1981. A review of research on subsonic turbulent flow reattachment // *AIAA J.* Vol. 19. P. 1093–1100.
- Ehrenstein U., Gallaire F.** 2008. Two-dimensional global low-frequency oscillations in a separating boundary-layer flow // *J. Fluid Mech.* Vol. 614. P. 315–327.
- Gallaire F., Marquillie M., Ehrenstein U.** 2007. Three-dimensional transverse instabilities in detached boundary layers // *J. Fluid Mech.* Vol. 571. P. 221–233.
- Gaster M.** 1992. Stability of velocity profiles with reverse flow // *Instability, Transition and Turbulence* / Eds. M. Y. Hussaini, A. Kumar, C. L. Street. Berlin: Springer. P. 212–215.
- Gibbings J.S., Goksel O.T., Hall D.J.** 1986. The influence of roughness trips upon boundary-layer transition. Part 1. Characteristics of wire trips // *Aeronaut. J.* Vol. 90. No. 898. P. 289–301.
- Goldstein M.E.** 1985. Scattering of acoustic waves into Tollmien–Schlichting waves by small streamwise variations in surface geometry // *J. Fluid Mech.* Vol. 154. P. 509–529.
- Hammond D.A., Redekopp L.G.** 1998. Local and global instability properties of separation bubbles // *Eur. J. Mech. B/Fluids.* Vol. 17. No. 2. P. 145–164.
- Hudy L.M., Naguib A., Humphreys W.M.** 2007. Stochastic estimation of a separated-flow field using wall-pressure-array measurements // *Phys. Fluids.* Vol. 19. P. 024103-1–024103-18.
- Kaiktsis L., Monkewitz P.A.** 2003. Global destabilization of flow over a backward-facing step // *Phys. Fluids.* Vol. 15. No. 12. P. 3647–3658.
- Klebanoff P.S., Tidstrom K.D.** 1972. Mechanism by which a two-dimensional roughness element induces boundary-layer transition // *Phys. Fluids.* Vol. 15. P. 1173–1188.
- Lanzerstorfer D., Kuhlmann H.C.** 2012. Global stability of the two-dimensional flow over a backward-facing step // *J. Fluid Mech.* Vol. 693. P. 1–27.
- Marquet O., Lombardi M., Chomaz J.-M., Sipp D., Jacquin L.** 2009. Direct and adjoint global modes of a recirculation bubble: lift-up and convective non-normalities // *J. Fluid Mech.* Vol. 622. P. 1–21.
- Marquet O., Sipp D., Chomaz J.-M., Jacquin L.** 2008. Amplifier and resonator dynamics of a low-Reynolds-number recirculation bubble in a global framework // *J. Fluid Mech.* Vol. 605. P. 429–443.
- Marquillie M., Ehrenstein U.** 2003. On the onset of nonlinear oscillations in a separating boundary-layer flow // *J. Fluid Mech.* Vol. 490. P. 169–188.
- Masad J.A., Iyer V.** 1994. Transition prediction and control in subsonic flow over a hump // *Phys. Fluids.* Vol. 6, No. 1. P. 313–327.
- Masad J.A., Malik M.R.** 1994. On the link between flow separation and transition onset // *AIAA Paper.* No. 94–2370.
- Masad J.A., Nayfeh A.H.** 1992. Stability of separating boundary layers // *Fourth Intern. Conf. of Fluid Mech.* Alexandria. Vol. 1. P. 261–278.
- Masad J.A., Nayfeh A.H.** 1993. The influence of imperfections on the stability of subsonic boundary layers // *Instabilities and Turbulence in Engineering Flows* / Eds. D.E. Ashpis et al. Dordrecht: Kluwer. P. 65–82.
- Michalke A.** 1990. On the inviscid instability of wall-bounded velocity profiles close to separation // *Z. Flugwiss. Weltraumforsch.* Vol. 14. P. 24–31.
- Michalke A.** 1991. On the instability of wall-boundary layers close to separation // *Separated Flows and Jets* / Eds. V.V. Kozlov, A.V. Dovgal. Berlin: Springer. P. 557–564.
- Michalke A., Kozlov V.V., Dovgal A.V.** 1995. Contribution to the instability of laminar separating flows along axisymmetric bodies. Part I: Theory // *Eur. J. Mech. B/Fluids.* Vol. 14. No. 3. P. 333–350.
- Nayfeh A.H., Ragab S.A., Al-Maaitah A.A.** 1988. Effects of bulges on the stability of boundary layers // *Phys. Fluids.* Vol. 31. P. 796–806.
- Nayfeh A.H., Ragab S.A., Masad J.A.** 1990. Effect of a bulge on the subharmonic instability of boundary layers // *Phys. Fluids A.* Vol. 2. No. 6. P. 937–948.
- Nishioka M., Morkovin M.V.** 1986. Boundary-layer receptivity to unsteady pressure gradients: experiments and overview // *J. Fluid Mech.* Vol. 171. P. 219–261.
- Reshotko E.** 2001. Transient growth: a factor in bypass transition // *Phys. Fluids.* Vol. 13, No. 5. P. 1067–1075.
- Schlatter P., Brandt L., de Lange H.C., Henningson D.S.** 2008. On streak breakdown in bypass transition // *Phys. Fluids.* Vol. 20. P. 101505-1–101505-15.

- Schmid P.J., Henningson D.S.** 2001. Stability and transition in shear flows. New York: Springer. 558 p.
- Sigurdson L.W., Roshko A.** 1988. The structure and control of a turbulent reattaching flow // Turbulence Management and Relaminarization / Eds. H.W. Liepmann, R. Narasimha. Berlin: Springer. P. 497–514.
- Sinha S.N., Gupta A.K., Oberai M.M.** 1981. Laminar separating flow over backsteps and cavities. Part I: Backsteps // AIAA J. Vol. 19. P. 1527–1530.
- Smith F.T., Bodonyi R.J.** 1985. On short-scale inviscid instabilities in flow past surface-mounted obstacles and other nonparallel motions // Aeronaut. J. Vol. 89. P. 205–212.
- Taghavi H., Wazzan A.R.** 1974. Spatial stability of some Falkner–Skan profiles with reversed flow // Phys. Fluids. Vol. 17. P. 2181–2183.
- Theofilis V., Hein S., Dallmann U.** 2000. On the origins of unsteadiness and three-dimensionality in a laminar separation bubble // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. Vol. 358. P. 3229–3246.
- Wee D., Yi T., Annaswamy A., Ghoniem A.F.** 2004. Self-sustained oscillations and vortex shedding in backward-facing step flows: simulation and linear instability analysis // Phys. Fluids. Vol. 16. No. 9. P. 3361–3373.

*Статья поступила в редакцию 17 ноября 2016 г.,
после доработки — 18 января 2017 г.*