

УДК: 532.526

А. В. Бойко¹, В. Н. Горев^{1,2}, В. В. Козлов^{1,2}¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: boiko@itam.nsc.ru**ПЕРЕХОД К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ:
УСПЕХИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ***

Приведен обзор результатов исследований по возникновению турбулентности в дозвуковых пристенных течениях. Рассматриваются традиционные аспекты проблемы, включающие линейную устойчивость и генерацию возмущений сдвиговых течений, а также более поздние стадии перехода к турбулентности. Обсуждаются современные подходы к описанию ламинарно-турбулентного перехода и последние опытные данные, уточняющие представления о переходе и возможностях управления им в различных условиях обтекания тел. Указаны перспективы исследований в рассматриваемой области.

В настоящее время прогресс в аэродинамике (уменьшение сопротивления среды движущимся в ней аппаратам, увеличение их маневренности, улучшение аэродинамических характеристик) связывают с пониманием физических процессов при ламинарно-турбулентном переходе в пограничных слоях. С одной стороны, именно здесь в последнее время достигнуто впечатляющее продвижение в понимании физической сути процессов, имеющих место при ламинарно-турбулентном переходе, а с другой – выявлен круг новых проблем, связанных с успехами в технологии микроскопических электромеханических систем, требующих своего осмысления и новых теоретических подходов.

**Задача гидродинамической
устойчивости**

Сохранение ламинарного режима обтекания тесно связано с теорией гидродинамической устойчивости. Для большинства задач о движении вязкой жидкости и заданных стационарных условиях должно в принципе существовать точное стационарное решение уравнений гидродинамики. Однако такие решения не только должны удовлетворять гидродинамическим уравнениям, но и быть устойчивыми: малые возмущения, раз возникнув, должны затухать со временем. Если же, напротив, неизбежно

возникающие в потоке жидкости сколь угодно малые возмущения стремятся возрасти со временем, то движение неустойчиво и фактически существовать не может [1]. Математическое исследование устойчивости движения среды по отношению к бесконечно малым возмущениям происходит по следующей схеме.

На исследуемое стационарное течение, в котором обозначим распределение скоростей как $v_0(\mathbf{r})$ и давление как $p_0(\mathbf{r})$, накладывается нестационарное малое возмущение скорости $v_1(t, \mathbf{r})$ и давления $p_1(t, \mathbf{r})$, определенное таким образом, что результирующее решение $v = v_0 + v_1$, $p = p_0 + p_1$ удовлетворяет уравнениям движения, а также начальным и граничным условиям. Уравнение для определения $v_1(t, \mathbf{r})$ и $p_1(t, \mathbf{r})$ получается подстановкой в гидродинамические уравнения движения (уравнения Навье–Стокса) этих величин в виде $v = v_0 + v_1$ и $p = p_0 + p_1$, причем известные функции v_0 и p_0 удовлетворяют стационарным уравнениям.

Таким образом, задача гидродинамической устойчивости сводится к решению системы дифференциальных уравнений на возмущения в частных производных, удовлетворяющих начальным и граничным условиям. В ряде практически важных случаев при использовании некоторых дополнительных упрощающих предположений (на-

* Работа поддержана РФФИ (грант № 05–01–00034), грантом президента РФ по поддержке ведущих научных школ РФ (№ НШ–964.2003.1), грантом президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (МК–1655.2005.1) и проектом Министерства образования и науки РФ № РНП.2.1.2.3370.

пример, параллельности линий тока среднего течения), переходя в спектральное пространство частот и волновых чисел, задачу удается свести к анализу одного или нескольких обыкновенных дифференциальных уравнений (уравнения Орра–Зоммерфельда, уравнение Гёртлера и т. п.). При однородных граничных условиях такой анализ эквивалентен исследованию поведения наименее устойчивых собственных значений (фазовых скоростей c или волновых чисел k) получающихся уравнений, которые соответствуют стационарным вихрям (например, Гёртлера на вогнутых поверхностях и поперечного течения на скользящих крыльях) или периодическим по времени волнам (например, Толлмина–Шлихтинга), распространяющимся в пограничных слоях.

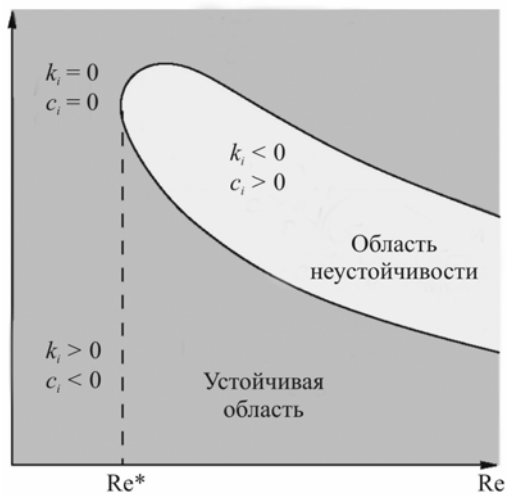


Рис. 1. Типичная кривая нейтральной устойчивости пограничных слоев при умеренных числах Рейнольдса при временном (k_i) и пространственном (c_i) развитии возмущений (индекс « i » означает мнимую часть величины)

Наибольший из параметров задачи (например, число Рейнольдса или Гёртлера), при котором все возмущения затухают, называется критическим числом (рис. 1). Расчет нейтральных кривых и таких критических чисел (например, Re^*) является одной из главных задач теории гидродинамической устойчивости, так как ими определяются области параметров, при которых основное ламинарное течение устойчиво или неустойчиво по отношению к малым возмущениям. Не менее важно знание инкрементов нарастания возмущений по времени и пространству внутри области неустойчивости, а также форма колебаний.

К настоящему времени получены обширные экспериментальные результаты, показывающие, что при *малой степени турбулентности* внешнего потока процесс

перехода в течениях, близких к двумерным, действительно может осуществляться через описанный механизм неустойчивости (рис. 2). Однако существуют результаты многочисленных экспериментов при *повышенной степени турбулентности* внешнего потока, свидетельствующие, что турбулизация пограничного слоя часто происходит не через этап доминирования волн неустойчивости, а через формирование в докритической области (например, при $Re < Re^*$) и последующий распад «полосчатых структур» (рис. 3). При этом локализованные вихревые возмущения из набегающего потока, проникая в сдвиговый слой, трансформируются в нем, приводя к появлению на дымовых визуализациях узких, вытянутых в продольном направлении полос. К настоящему времени показано, что такие структуры характеризуются особой формой, скоростью распространения, нерасплываемостью в трансверсальном направлении и специфическим поведением амплитуды, что в комплексе четко отличает их от других вихревых образований в области ламинарно-турбулентного перехода в пограничных слоях.

Для описания особенностей развития полосчатых структур в пограничных слоях предложено несколько подходов [1]. Их объединяет то, что структуры рассматриваются как стационарные или квазистационарные модуляции преимущественно продольной компоненты скорости пристенного сдвигового потока в трансверсальном направлении, возникающие в *ближней зоне* источников возмущений в присутствии нормальной компоненты скорости возмущения.

Для объяснения возникновения полосчатых структур эти подходы используют свойства неортогональности собственных функций линейных операторов, описывающих поведение возмущений в сдвиговом потоке. Это математическое свойство соответствует в реальности возможности реализации сильного эффекта установления в сдвиговом слое, называемого «эффектом опрокидывания», для широкого спектра начальных возмущений. Результатом «опрокидывания» являются структуры, многие свойства которых, как оказывается, действительно близки наблюдаемым в эксперименте у полосчатых структур. Эффекты установления по определению должны наблюдаться вблизи источника возмущения, но (квази)стационарность полосчатых структур, как правило, приводит к тому, что размерная область развития этих возмущений вниз по потоку очень велика.

Предтурбулентное развитие возмущений в двумерных пограничных слоях

Несмотря на регистрируемые в эксперименте большие амплитуды возмущений продольной компоненты скорости в полосчатых структурах (вплоть до 15–20 % от скорости внешнего потока), они развиваются в основном в соответствии с линейными моделями. Вместе с тем отмечено, что полосчатая структура может давать толчок

развитию турбулентного пятна, причем на этапе, непосредственно предшествующем его образованию, она обычно испытывает высокочастотные колебания. Один из предложенных механизмов генерации этих колебаний состоит в неустойчивости профилей продольной компоненты скорости в полосчатых структурах, что аналогично механизму вторичной неустойчивости в продольных стационарных вихрях различной этимологии.

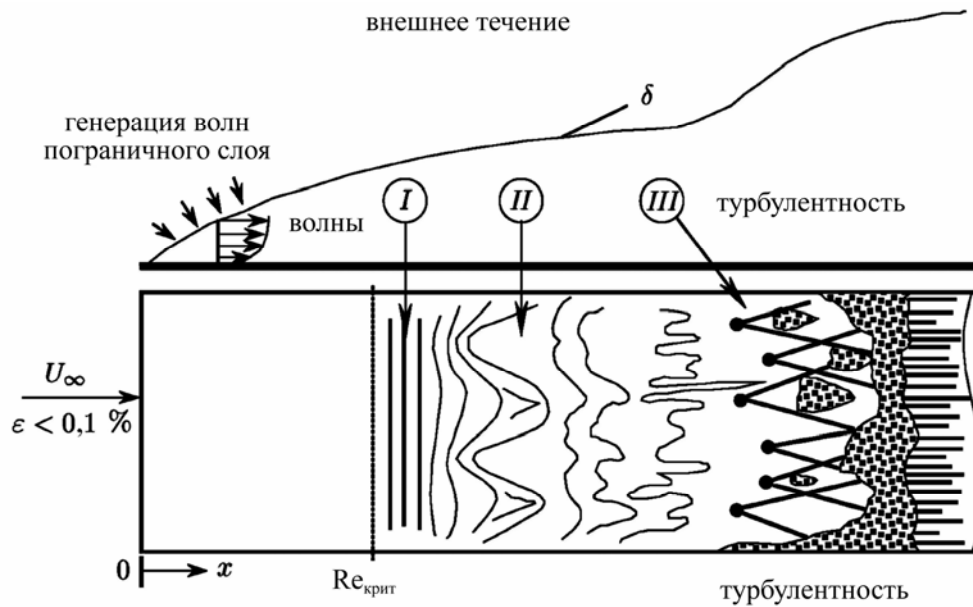


Рис. 2. Схема основных стадий процесса перехода к турбулентности в пограничном слое при малой степени турбулентности набегающего потока: I – возмущение малых амплитуд (волн Толлмина–Шлихтинга), II – стадия трехмерного развития волн неустойчивости конечных амплитуд (Λ -структур), III – область образования, развития и взаимодействия турбулентных пятен

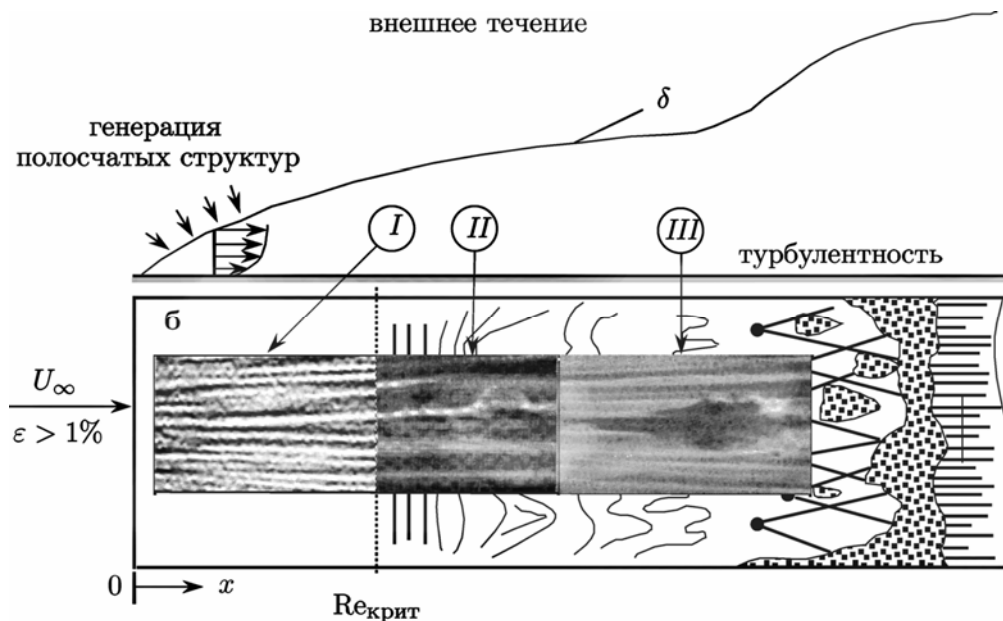


Рис. 3. Сценарии перехода к турбулентности при повышенной степени турбулентности набегающего потока: I – стадия развития полосчатых структур; II – область нелинейного развития и зарождения турбулентных пятен; III – область развития и взаимодействия турбулентных пятен

Экспериментальные результаты показывают, что турбулизации течения при наличии в нем волн неустойчивости тоже всегда предшествует развитие трехмерной структуры возмущений в области перехода, т. е. поле средних и пульсационных скоростей приобретает квазипериодическую структуру в трансверсальном направлении (рис. 4). В зависимости от амплитуды первичных волн и спектра возмущений в пограничном слое наблюдаются различные сценарии ламинарно-турбулентного перехода, т. е. преобладают те или иные нелинейные механизмы.

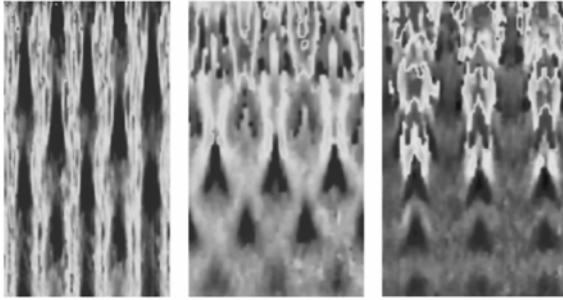


Рис. 4. Картины визуализации различных сценариев перехода в пограничном слое плоской пластины [2]

Например, двумерная волна Толлмина–Шлихтинга на нелинейной стадии своего развития претерпевает трехмерное искажение при достижении определенной амплитуды, в результате чего возникают характерные трехмерные Λ -структуры [1], кото-

рые, развиваясь вниз по потоку, нарастают, всплывая в потоке по направлению к внешней границе пограничного слоя, и, взаимодействуя друг с другом, способствуют окончательной турбулизации потока.

В этих ситуациях широко распространенной моделью возникновения и развития высокочастотных возмущений, свойственных турбулентным потокам, рассматривается вторичная неустойчивость таких пространственно периодических течений.

Вторичная неустойчивость типична как для стационарных (например, вихрей Гёртлера), так и для нестационарных трехмерных структур (например, полосчатых и Λ -образных) [1]. Создаваемая ими трансверсальная модуляция пограничного слоя создает по нормали к поверхности перегибные профили скорости и поперек потока неустойчивые по отношению к высокочастотным колебаниям, эволюция которых вниз по потоку и приводит к окончательной турбулизации.

Вторичная неустойчивость переходных пристенных течений при наличии в них полосчатых структур часто характеризуется усилением нескольких мод возмущений. Так, визуализация потока, модулированного вихрями Гёртлера [3], показывает, что переход в таком течении определяется вторичными механизмами либо в виде «меандрирования» вихрей в поперечном направлении, либо в форме подковообразных жгутов

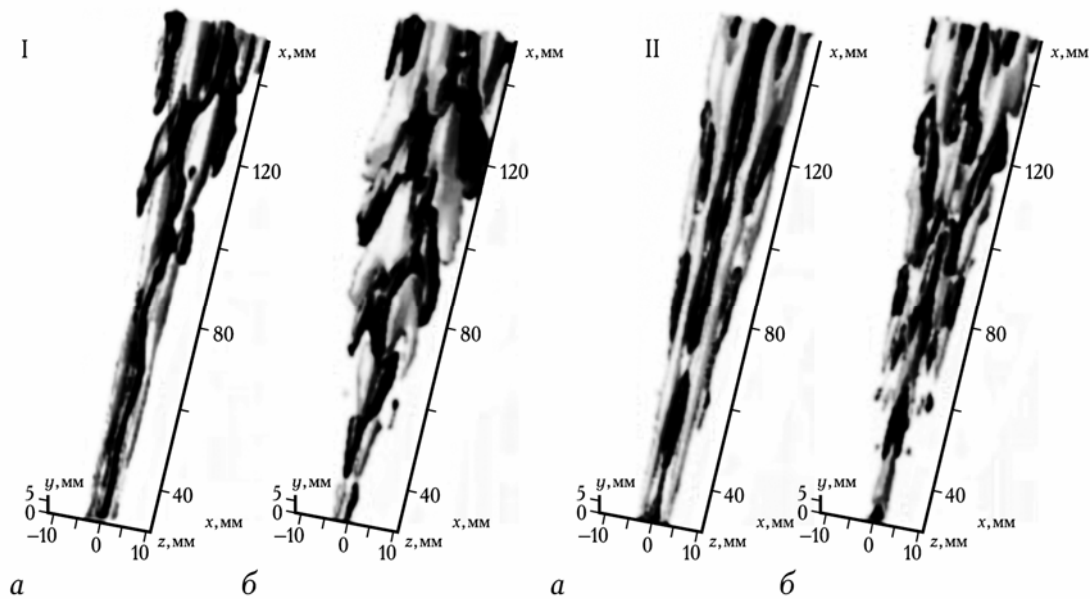


Рис. 5. Картины синусоидального (I) и варикозного (II) разрушения полосчатой структуры: а – пространственная картина развития вторичного возмущения совместно с его влиянием на среднюю скорость; б – пространственная картина развития вторичного возмущения (темные полутона – превышение скорости, светлые полутона – дефекты скорости) [4]

в области сильного поперечного сдвига. Такие возмущения называют синусоидальной и варикозной модой соответственно (рис. 5). Они сопоставляются многими исследователями с «нечетной» и «четной» модами, известными из аналитического и численного анализа вторичной неустойчивости вихрей Гёртлера. Доминирование той или иной моды на практике зависит от конкретных начальных условий, в частности от расстояния между возмущениями.

Особенности вторичной неустойчивости трехмерных пограничных слоев

На структуру потока оказывают влияние такие факторы, как отрыв пограничного слоя, кривизна линий тока и поперечное течение (рис. 6). Течение в пограничном слое скользящего крыла также характеризуется наличием поперечного течения. Устойчивость таких течений давно и широко исследуется многими исследователями как в теоретических, так и экспериментальных работах [1]. Из-за асимметрии, связанной с поперечным течением, поведение волн неустойчивости и продольных структур претерпевает качественные изменения. Так, характерной особенностью развития продольных структур на скользящем крыле является исчезновение одного из противовращающихся вихрей (рис. 7).

Важный аспект, касающийся полосчатых структур, это их роль в процессе турбулизации осесимметричных течений, например, в круглой струе. Такие структуры возникают в струях непосредственно на выходе из плоских и круглых сопел [7; 8]. При взаимодействии двумерных вихревых колец Кельвина–Гельмгольца с полосчатыми структурами происходит их трехмерное искажение с образованием характерных азимутальных Λ - или Ω -образных выбросов (рис. 8).

Управление ламинарно-турбулентным переходом

С практической точки зрения изучение возмущений пограничного слоя в области перехода к турбулентности имеет одной из целей улучшение способов управления им. С другой стороны, различные способы воздействия на исследуемый объект позволяют дополнительно продвинуть фундаментальное понимание роли различных факторов при ламинарно-турбулентном переходе. Поэтому развитие эффективных методов управления переходом к турбулентности является составной частью задачи их изучения.

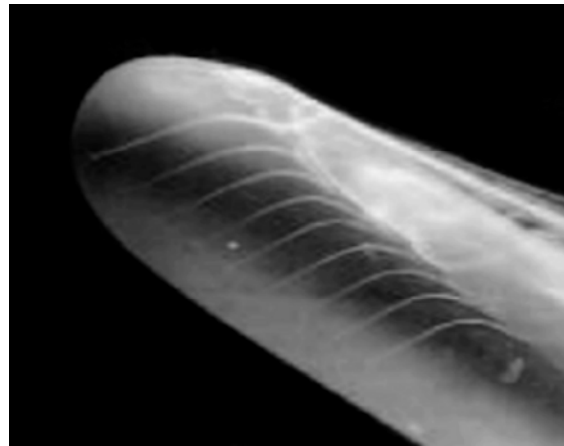


Рис. 6. Визуализация ламинарного обтекания тела вращения под углом атаки [5]

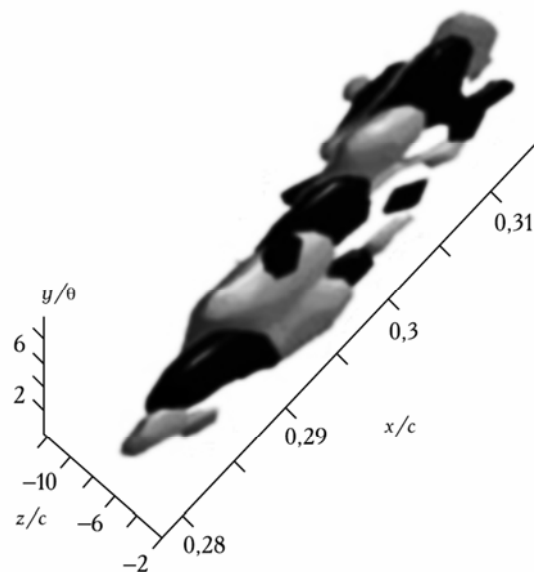


Рис. 7. Пространственная картина развития высокочастотного вторичного возмущения, развивающегося на полосчатой структуре в пограничном слое скользящего крыла [6]



Рис. 8. Визуализация поперечного сечения круглой струи в процессе взаимодействия кольцевого вихря с полосчатыми структурами и образованием при этом азимутальных Λ -структур

Потенциальная возможность существенно снизить сопротивление за счет затягивания перехода к турбулентности в пограничном слое обтекаемых тел хорошо известна. Управление переходом к турбулентности основывается на том фундаментальном факте, что турбулентность в пограничном слое возникает как результат роста малых возмущений. Классические методы управления, как правило, имеют целью видоизменить среднее течение в пограничном слое таким образом, чтобы обеспечить его большую устойчивость к возмущениям потока. К типичным методам достижения этого относят создание благоприятного градиента давления, охлаждение поверхности в воздухе или нагрев ее в воде, отсос и т. д.

В последние два десятилетия заметное внимание отводится риблетам – небольшим канавкам или бороздкам, расположенным примерно вдоль местной скорости потока у стенки, как средству управления пограничным слоем. Будучи достаточно простыми по конструкции и не требующими дополнительных затрат энергии при работе, эти устройства способны обеспечивать снижение сопротивления трения в некоторых случаях более, чем на 10 %. Например, воздействие риблет на развитие Λ -структуры демонстрируется на рис. 9 изоповерхностями равного уровня пульсаций скорости в пространстве.

По мере движения вниз по потоку Λ -структура на гладкой поверхности трансформируется в более сложную структуру с множе-

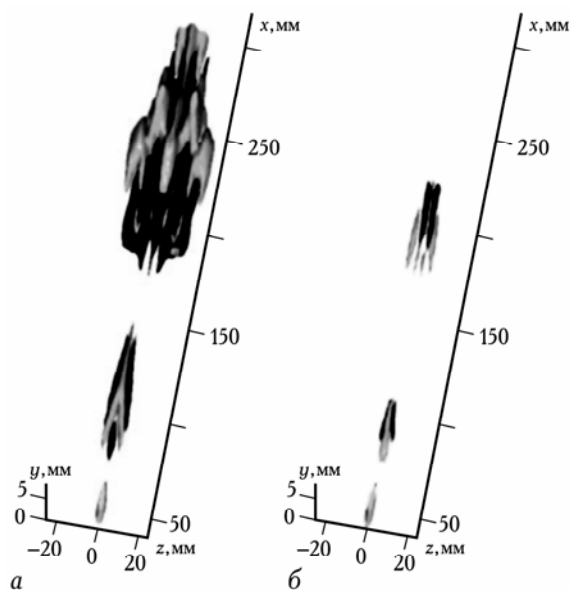


Рис. 9. Пространственные картины термоанемометрической визуализации развития Λ -структуры на гладкой (а) и оребренной (б) поверхности плоской пластины (темные полутона – превышение скорости, светлые полутона – дефект скорости) [9]

ством областей дефекта и превышения скорости, постепенно увеличивается ее поперечный и продольный масштабы, т. е. она преобразуется в уединенное турбулентное пятно. В противоположность этому процессу на риблетах при движении вниз по потоку Λ -структура меняется слабо и в конечном счете течение остается ламинарным.

В какой-то мере альтернативным путем управления переходом является воздействие не на средний поток, а на сами возмущения, т. е. усиление или подавление развивающихся волн неустойчивости с помощью возмущений той же природы и частоты, но с ненулевой относительной фазой. Такой путь управления переходом при помощи суперпозиции возмущений требует эффективных методов генерации возмущений (и понимания физики ламинарно-турбулентного перехода) в пограничном слое, а также умения правильно поставить и решить задачу о восприимчивости пограничного слоя к внешним возмущениям, т. е. умения решать задачу с начальными данными, что является темой многочисленных современных исследований [1].

При этом основным предположением является то, что естественные волны имеют некоторые доминантные возмущения, которые можно характеризовать линейными волнами. Предполагается, что эти неустойчивости характеризуются дискретными частотами в спектре. Такие возмущения в пограничном слое можно моделировать, возбуждая вибрирующей лентой, системой нагревательных элементов или звуком. Тогда управляющая волна подходящей амплитуды и фазы, создаваемая вторым волнообразователем, расположенным ниже по потоку, может использоваться для минимизации амплитуды первичной волны в пограничном слое.

Из-за показанной в модельных опытах эффективности этого метода необходимо расширить понимание его применимости для управления произвольным трехмерным полем возмущений. Кроме того, нужны исследования для оценки применимости метода в более реалистичных ситуациях, а также в присутствии продольных вихрей и полосчатых структур.

Активное управление на практике должно включать в себя датчики, анализаторы и активаторы. Очевидно, что для достижения существенной задержки перехода на этой нелинейной стадии или в трехмерных течениях использование методов разрушения волн потребует применения большого количества детекторов возмущений и сложной

системы управления, которая может разрушить как первичные, так и остаточные возмущения. При этом возникают и интересные физические явления.

Например, в случае импульсного воздействия через «точечное» отверстие в пограничный слой вводится возмущение, с широким спектром частот и волновых чисел, часть из которых может в области неустойчивости привести к возникновению волнового пакета, нарастающего по амплитуде вниз по потоку и приводящего к образованию турбулентного пятна.

Данное явление неоднократно наблюдалось при исследованиях продольных структур, вводимых в пограничный слой с помощью мембраны или вдувом-отсосом среды, и получило название «предвестник» (рис. 10), поскольку он возникает в области течения, предшествующей резкому изменению скорости потока (на фронтах продольного возмущения). Фактически предвестник является результатом развития «прямоугольного импульса» при нестационарном вдуве или отсосе в пограничном слое: в результате дисперсии фронты исходного импульса разделяются по частотам, из которых усиливаются лишь наиболее неустойчивые.

В процессе своего развития предвестники преобразуются в Λ -образные структуры, развивающиеся в свою очередь в турбулентные пятна. К настоящему времени выяснено, что процесс трансформации предвестника во многом определяется условиями его возникновения. Сглаживание фронтов, позволяет добиться отсутствия предвестников.

Соответствие масштабам длин между активаторами и контролируемым явлениями – основное требование в этих случаях. Микромашинная технология [10] является новейшей областью техники, позволяющей производить механические части и целые устройства микронных размеров. Для механики жидкости и газа эта технология, по всей видимости, даст в недалеком будущем возможность создавать требуемые наборы микродатчиков и микродвигателей для управления течением. Поскольку их массы, теплопроводности и другие инерциальные характеристики очень малы, удовлетворяется основное требование к ним – отклик на высокие частоты. Более того, в перспективе представляется возможным достичь интерактивного распределенного управления соединением на одной поверхности микродатчиков, микродвигателей и микропроцес-

соров (нейронная сеть) для создания интегрированной системы управления (рис. 11).

Такая система имеет на поверхности датчики напряжения сдвига, улавливающие локализованные вихри возмущений в нели-

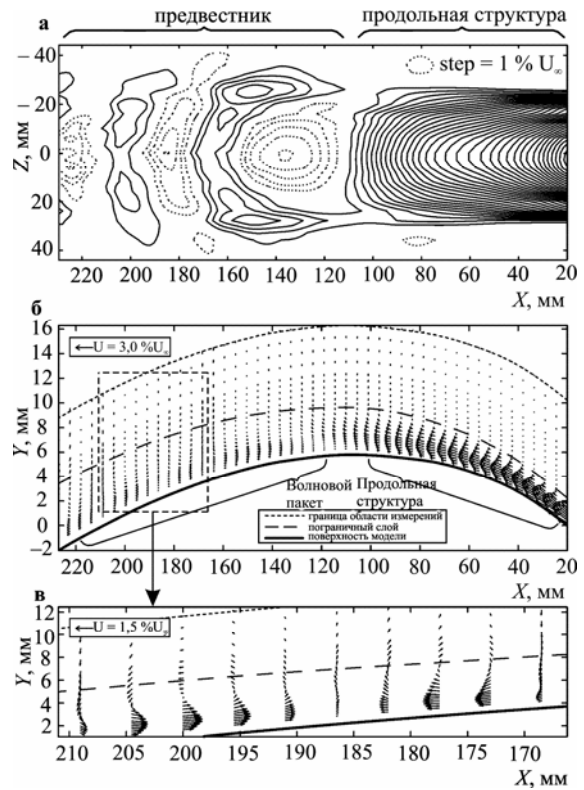


Рис. 10. Изолинии мгновенного поля пульсаций продольной составляющей скорости полосчатой структуры и предвестника на ее переднем фронте в пограничном слое прямого крыла в двумерной области, огибающей поверхность на уровне максимума возмущений (а). Поле пульсаций продольной и нормальной к поверхности скоростей в плоскости симметрии структуры (б), тот же момент времени, что и (а). Виден передний фронт продольной структуры и порожденный им предвестник. Поле скоростей одного периода волны предвестника в увеличенном масштабе (в)

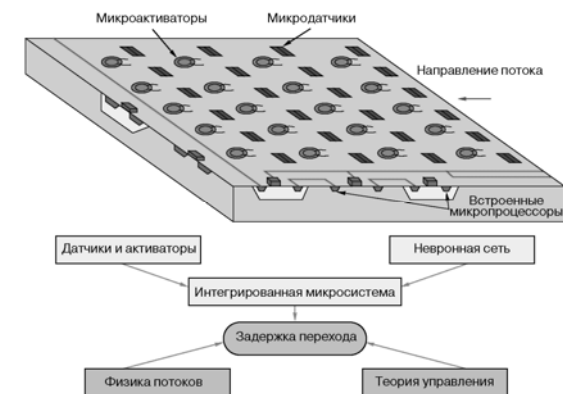


Рис. 11. Схема активного контроля процесса перехода к турбулентности с использованием микроскопических электромеханических систем

нейной области пограничного слоя, встроенную нейронную сеть для обработки сигналов в соответствии с алгоритмом распознавания образов и набор, например, магнитных закрылков для уменьшения и управления вихрями. Этот подход может открыть новые горизонты для интерактивного управления течениями, но также ставит новые научные и инженерные задачи относительно распределенного управления, исследования усталостных свойств микромеханических частей и изучения явлений потока на микронном уровне.

Список литературы

1. *Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В.* Физические механизмы перехода в открытых течениях. М.; Ижевск.: РХД, 2006. 301 с.
2. *Berlin S.* Oblique waves in boundary layer transition // TRITA-MEK Tech. Rep. 1998. № 7. 173 p.
3. *Ito A.* Breakdown Structure of Longitudinal Vortices along a Concave Wall // J. Japan Soc. Aero. Space Sci. 1985. Vol. 33. P. 166–173.
4. *Литвиненко Ю. А., Чернорай В. Г., Козлов В. В. и др.* О нелинейной синусоидальной и варикозной неустойчивости в пограничном слое (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11, № 3. С. 339–365.
5. *Ван-Дайк М.* Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986. 184 с.
6. *Литвиненко Ю. А., Грек Г. Р., Козлов В. В. и др.* Экспериментальное исследование варикозной неустойчивости полосчатой структуры в пограничном слое скользящего крыла. // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11, № 1. С. 1–10.
7. *Козлов В. В., Грек Г. Р., Лефдаль Л. Л. и др.* Роль продольных локализованных структур в процессе перехода к турбулентности в пограничных слоях и струях (Обзор) // ПМТФ. 2002. Т. 43, № 2. С. 62–76.
8. *Литвиненко М. В., Козлов В. В., Козлов Г. В., Грек Г. Р.* Влияние продольных полосчатых структур на процесс турбулизации круглой струи. // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 3. С. 50–61.
9. *Грек Г. Р., Козлов В. В., Чернорай В. Г.* Гидродинамическая неустойчивость пограничных слоев и отрывных течений // Успехи механики. 2005. Т. 3, № 4. С. 3–40.
10. *Gad-el-Hak M.* Flow control. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 421 p.

Материал поступил в редколлегию 14.09.2006