

**PHYSICAL PROCESSES  
IN FLOW**

V. V. KOZLOV

*The hydrodynamic stability theory is considered, including its problematic and basic features of the linear stability theory. Some aspects of a non-linear stability theory are presented. Conception of the laminar-turbulent transition in a boundary layer of a streamlined body is introduced. A new method may be applied for laminar-turbulent transition control using micro electromechanical systems.*

**Рассматривается теория гидродинамической устойчивости, включая постановку задачи, и основные положения линейной теории устойчивости. Приводятся некоторые элементы нелинейной теории устойчивости. Вводится понятие ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое обтекаемого тела. Отмечается появление нового направления исследований по управлению ламинарно-турбулентным переходом на основе микромашинной технологии.**

© Козлов В.В., 1997

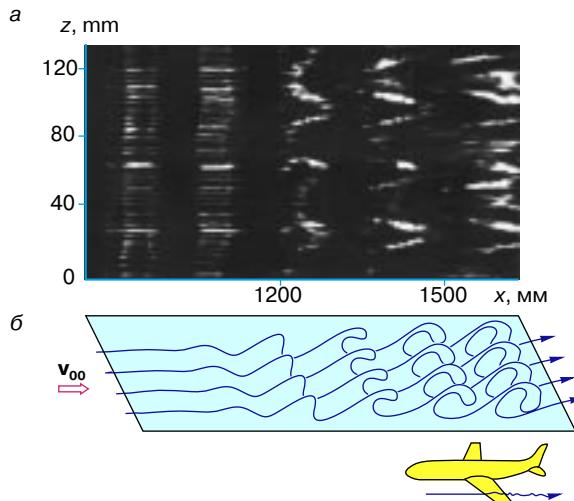
**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
В ПОТОКАХ**

**В. В. КОЗЛОВ**

Новосибирский государственный университет

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время прогресс в аэrodинамике (уменьшение сопротивления среды движущимся в ней аппаратам, увеличение их маневренности, улучшение аэродинамических характеристик) связывают с решением нескольких физических проблем: во-первых, с сохранением ламинарного режима обтекания летательного аппарата (проблема ламинаризации); во-вторых, с пониманием и управлением отрыва потока на обтекаемой поверхности; в-третьих, с преобразованием структуры турбулентного течения с целью снижения сопротивления. В то же время эти вопросы являются составной частью более общей фундаментальной проблемы описания турбулентности, и здесь, несмотря на большие успехи, еще многие задачи требуют своего решения. Чтобы показать возможности и проблемы экспериментального и теоретического изучения в аэрогидродинамике, остановимся более подробно на первой задаче — проблеме сохранения ламинарного режима обтекания (пример развития возникающих возмущений на крыле самолета показан на рис. 1). Именно здесь в последнее время достигнуто впечатляющее продвижение в понимании физической сути процессов, с одной стороны, а с другой — выявлен круг новых проблем, связанных с успехами в



**Рис. 1.** Развитие возникших на крыле самолета возмущений, ответственных за ламинарно-турбулентный переход: *а* – визуализация в одном из сечений, *б* – общая картина структуры течения (схема)

технологии микроэлектромеханических систем, требующих своего осмыслиния и новых теоретических подходов.

Сохранение ламинарного режима обтекания в этом случае, то есть в случае, когда слои жидкости или газа у тела двигаются параллельно друг другу, не перемешиваясь (в противоположность турбулентному, когда существует сильное перемешивание), тесно связано с теорией гидродинамической устойчивости.

## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

### Постановка задач гидродинамической устойчивости

Для большинства задач о движении вязкой жидкости и заданных стационарных условиях должно в принципе существовать точное стационарное решение уравнений гидродинамики. Эти решения формально существуют при любых числах Рейнольдса, характеризующих параметры потока. Но не всякое решение уравнений движения, даже если оно точное, может реально воплотиться в природе. Движения должны не только удовлетворять гидродинамическим уравнениям, но еще должны 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, 2]. Математическое исследование устойчивости движения по отношению к бесконечно малым возмущениям должно происходить по следующей схеме. На исследуемое стационарное решение (распределение скоростей, в котором пусть будет  $\mathbf{v}_0(t, \mathbf{r})$  и давление  $p_0$ ) накладывается нестационарное малое возмущение скорости  $\mathbf{v}_1(t, \mathbf{r})$  и давления  $p_1(t, \mathbf{r})$ , которое должно быть определено таким образом, чтобы результатирующее решение  $\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_1$ ,  $p = p_0 + p_1$  удовлетворяло уравнениям движения, начальным и граничным условиям. Уравнение для определения  $\mathbf{v}_1(t, \mathbf{r})$  и  $p_1(t, \mathbf{r})$  получается подстановкой в уравнения Навье–Стокса (уравнения движения жидкости) скорости и давления в виде  $\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_1$  и  $p = p_0 + p_1$ , причем известные функции  $\mathbf{v}_0$  и  $p_0$  удовлетворяют стационарным уравнениям. Тогда и получается система уравнений для нахождения возмущений.

Таким образом, в нашем случае задача об устойчивости сводится к решению системы дифференциальных уравнений в частных производных, удовлетворяющих начальным и граничным условиям. Эти уравнения описывают отклонения от некоторого невозмущенного состояния системы. Изменение во времени и пространстве этих малых отклонений в общем случае называется волновым процессом.

### Линейная теория устойчивости вязкой жидкости

Существует классический подход к этим задачам – метод элементарных волновых решений (подстановочный анализ), который состоит в следующем: исходные уравнения линеаризуются относительно некоторого невозмущенного решения. Получающиеся линейные уравнения инвариантны относительно сдвига во времени и по одной из координат, скажем  $x$ . Тогда решение можно искать в виде, пропорциональном  $e^{i(\omega t - kx)}$ . При этом возникает задача отыскания значений частоты  $\omega$  и волнового числа  $k$ , при которых линеаризованные однородные уравнения при надлежащих краевых условиях имеют нетривиальное решение. Тогда в общем случае получается неявная зависимость между  $\omega$  и  $k$ , которую называют дисперсионным уравнением  $D(\omega, k) = 0$ . Если найдутся такие решения этого дисперсионного уравнения  $\omega(k)$ , для которых  $\text{Im}\omega(k) < 0$  при некоторых вещественных  $k$ , то говорят, что невозмущенное состояние неустойчиво по отношению к возмущению. Если же  $\text{Im}\omega(k) > 0$  для всех вещественных  $k$ , то невозмущенное состояние считается устойчивым.

Обычно эволюцию во времени любого возмущения, возникшего в момент времени  $t = 0$ , можно проследить, рассматривая его разложение по элементарным волновым решениям. Если у некоторых из решений  $\text{Im}\omega(k) < 0$ , то возмущение нарастает и действительно возникает неустойчивость. В том случае, когда  $\text{Im}\omega(k) > 0$ , говорят, что система устойчива.

По аналогии с задачей о временной неустойчивости можно интерпретировать как пространственное усиление такие решения дисперсионного уравнения  $\omega(k)$ , у которых  $\text{Im}\omega(k) > 0$  при некоторых вещественных  $\omega$ .

Если при абсолютной неустойчивости процессы нарастают во времени, постепенно охватывая всю систему, то при конвективной неустойчивости процессы нарастают в пространстве, так как возникшие возмущения, нарастают, сносятся к выходу из системы (в нашем случае к задней кромке крыла самолета). При не слишком большой длине системы и хорошо согласованном выходе (отсутствие отраженных волн) все возмущения могут покинуть систему, не достигнув заметной величины.

Развитие возмущения во времени представляет интерес в основном с теоретической точки зрения. К практически реализуемым ситуациям более подходит рассмотрение возмущений, периодических во времени, с амплитудой, изменяющейся при движении в направлении течения. Тогда следует считать действительной частоту  $\omega = kc$ , а волновое число  $k = k_r + k_i$  – комплексным, где  $k_r = 2\pi/\lambda$  задает длину волны  $\lambda$ , а  $k_i$  – скорость пространственного нарастания возмущений. Если  $k_i > 0$ , возмущение затухает при его распространении в направлении

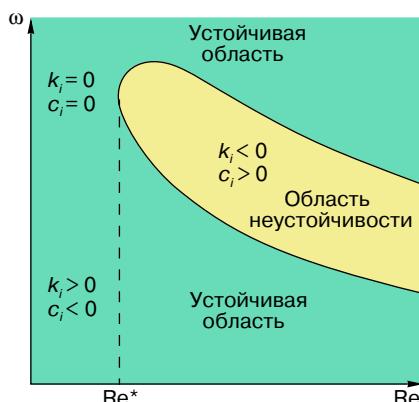
течения, течение устойчиво; если  $k_i < 0$ , возмущение растет с ростом  $x$ , течение неустойчиво.

В пограничном слое такой подход приводит нас к известному уравнению Оппа–Зоммерфельда [1], в котором граничными являются условия прилипания на твердой поверхности и ограниченности (фактически исчезновения) возмущения на бесконечности.

Однородные граничные условия определяют задачу об устойчивости течения как задачу на собственные значения для этого уравнения. Решение задачи приводит к характеристическому уравнению, которое определяет собственные значения  $c = c(k, Re)$ , и в частности значения  $c_i = c_i(k, Re)$ . Значения  $c_i = 0$  дают в плоскости  $(k, Re)$  кривую  $k = k(Re)$ , отделяющую область параметров, при которых течение устойчиво, от области неустойчивости и называемую кривой нейтральной устойчивости или нейтральной кривой (рис. 2).

Наибольшее из чисел Рейнольдса, при котором все возмущения затухают, называется критическим числом Рейнольдса и обозначается  $Re^*$ . Расчет нейтральных кривых, и в частности критических чисел Рейнольдса, является одной из главных задач теории гидродинамической устойчивости, так как этим 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.

Для исследования развития возмущений конечной амплитуды решение этой задачи является отправной точкой и необходимо ее полное решение, то есть нахождение не только собственных значений, но и собственных функций.



**Рис. 2.** Типичная кривая нейтральной устойчивости для течений пограничного слоя при временном ( $k_i$ ) и пространственном ( $c_i$ ) развитии возмущений

### Нелинейная теория устойчивости

Нелинейное развитие возмущений и возможные пути перехода к турбулентному режиму течения впервые рассматривались Л.Д. Ландау [1]. Он предложил уравнение, описывающее изменение модуля амплитуды возмущений во времени:

$$\frac{\partial A^2}{\partial t} = \varepsilon A^2 - \gamma A^4, \quad (1)$$

его решение записывается в виде

$$A^2 = A_0^2 \exp(\varepsilon t) \{ \varepsilon - \gamma A_0^2 [1 - \exp(-\varepsilon t)] \}^{-1}. \quad (2)$$

Анализ показывает, что в зависимости от знаков  $\varepsilon$ ,  $\gamma$  и величины  $A_0^2$  наблюдается различный характер изменения  $A$ . Для отрицательных значений  $\varepsilon$  и  $\gamma > 0$  независимо от величины  $A_0^2$  возмущения затухают при  $t \rightarrow \infty$ . Если  $A_0^2 \ll 1$ , то затухание наблюдается и при  $\varepsilon < 0$ ,  $\gamma < 0$ . Однако в случае  $A_0^2 > \varepsilon/\gamma$  возмущения неограниченно возрастают при  $t \rightarrow t_0 = -(1/\varepsilon) \ln [1 - \varepsilon/(A_0^2 \gamma)]$ , даже если  $\varepsilon < 0$  и  $\gamma < 0$ . Этот случай часто называют *жестким возбуждением*. Независимо от амплитуды  $A_0$  значение  $A$  неограниченно возрастает при  $t \rightarrow t_0$  для  $\varepsilon > 0$  и  $\gamma < 0$ . При  $\varepsilon < 0$ ,  $\gamma > 0$  и  $A_0^2 = -\varepsilon/\gamma$  значение  $A = -\varepsilon/\gamma$ . Если  $\varepsilon = 0$ , то решение принимает вид  $A^2 = A_0^2 (1 - \gamma A_0^2 t)^{-1}$ . Таким образом, при  $\gamma < 0$  возмущения затухают при  $t \rightarrow \infty$ , а при  $\gamma > 0$  и  $A \rightarrow \infty$ , когда  $t \rightarrow 1/(\gamma A_0^2)$ . Наконец, для любых значений начальной амплитуды  $A_0$ ,  $A \rightarrow \varepsilon/\gamma$  (при  $t \rightarrow \infty$ ), если  $\varepsilon > 0$  и  $\gamma > 0$ . Если развитие возмущений в потоках описывается данным уравнением, то в последнем случае можно говорить о выходе на новый ламинарный режим течения, хотя и необязательно стационарный ( $A$  – модуль амплитуды). Кроме того, последний случай является примером *мягкого возбуждения*.

В настоящее время теория Ландау получила дальнейшее развитие, в частности в вопросах бифуркации решений, нелинейного резонансного взаимодействия и стохастизации детерминированных возмущений [1].

Экспериментальные результаты по исследованию области нелинейного развития неустойчивостей в пограничном слое на плоской пластине показывают, что турбулизации течения всегда предшествует развитие трехмерной структуры возмущений в области перехода, то есть поле средних и пульсационных скоростей приобретает почти-периодическую структуру в трансверсальном направлении (см. рис. 1), где хорошо видно наличие крупномасштабных нейронодностей, так называемых  $\Lambda$ -образных вихрей, которые, развиваясь вниз по потоку, нарастают, всплывая в потоке по направлению к внешней границе пограничного слоя, и, взаимодействуя друг с другом, приводят к турбулизации потока. Следует заметить, что в зависимости от амплитуды первичных волн и спектра возмущений в пограничном слое могут наблюдаться различные сценарии

ламинарно-турбулентного перехода, а это означает преобладание тех или иных нелинейных механизмов.

## УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЙ

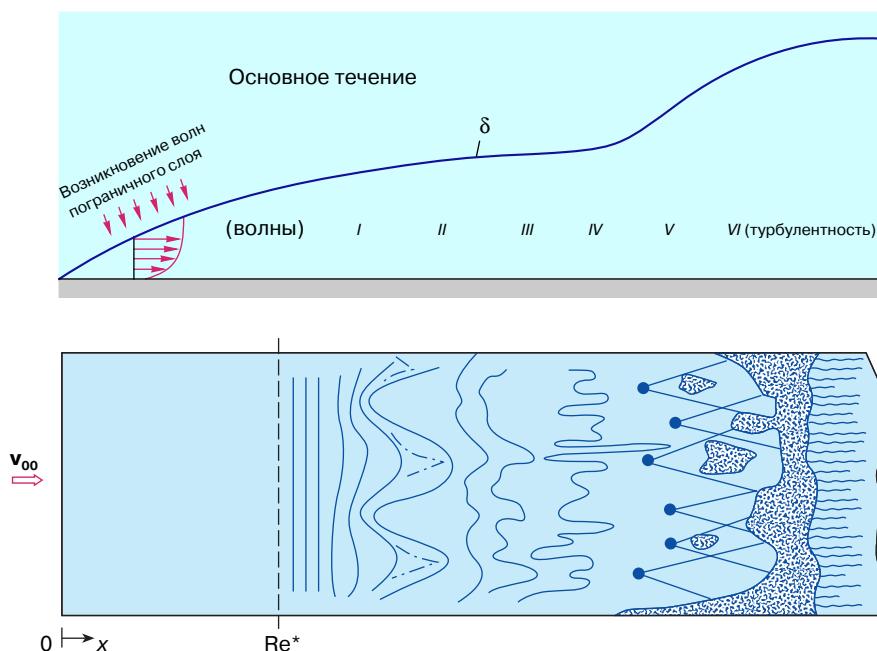
### Явление ламинарно-турбулентного перехода

Под понятием “переход”, как правило, понимаются собственно процесс распада ламинарного режима и формирование турбулентного течения. Начало перехода обычно связывают с появлением бурных процессов в виде турбулентных пятен и низкочастотных пульсаций большой амплитуды. Однако в настоящее время стало совершенно очевидным, что длинная последовательность физических процессов, приводящая в конечном счете к разрушению ламинарного течения (по крайней мере в случае малой интенсивности внешних возмущений), берет начало намного раньше, а именно в трансформации внешних возмущений различной природы во внешнем потоке волны пограничного слоя либо в их генерации в самом пограничном слое, происходящей на неровностях обтекаемой поверхности (уступы, шероховатости и т.п.). В соответствии с этим термин “процесс перехода к турбулентности” или эквивалентный ему термин “возникновение турбулентности” понимаются в широком смысле как совокупность всех явлений, ответственных за разрушение

ламинарного режима течения и образование турбулентного пограничного слоя.

Таким образом, процесс перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентное состояние при малой интенсивности внешних возмущений состоит из трех условно разделяемых этапов: генерация волн пограничного слоя, их усиление по законам линейной теории и нелинейное разрушение ламинарного режима течения. Каждому этапу в перечисленной последовательности соответствуют характерные области в пространстве по мере возрастания расстояния от передней кромки модели. Отметим, что последняя, нелинейная область развития процесса перехода относительно малопротяженна и характер ее в значительной степени определяется свойствами исходного течения, внешних возмущений и процессами, происходящими в предыдущих двух областях.

Описанная последовательность стадий перехода схематически показана на рис. 3. Как видно, переход ламинарного течения в турбулентное в пограничном слое является непрерывным процессом, начиная от возбуждения малых возмущений и кончая установлением развитого турбулентного течения со своим характерным профилем средней скорости и внутренней структурой. Однако в практических приложениях важно понятие “точка перехода”. С точкой перехода связывают начало



**Рис. 3.** Схема основных стадий процесса перехода к турбулентности в пограничном слое: I – стадия неустойчивости возмущений малых амплитуд (волны Толлинга–Шлихтинга), II – стадия трехмерного развития волн неустойчивости конечных амплитуд ( $\lambda$ -структур), III – область развития продольных вихревых образований, IV – стадия концентрации завихренности и слоев сильного сдвига, V – область образования турбулентных пятен, VI – стадия развития и взаимодействия турбулентных пятен

заметных изменений в структуре течения и его интегральных характеристиках. На фиксации этих изменений основано множество способов экспериментального определения положения точки перехода: по отклонению средней скорости от ламинарного закона, по изменению закономерности распределения полного давления (один из наиболее распространенных методов), коэффициентов трения и теплоотдачи, характеру поведения возмущений при термоанемометрических измерениях и по распределению коэффициента перемежаемости и т.д. Перестройка течения происходит неоднородно по толщине пограничного слоя и различным образом оказывается на различных параметрах течения.

В действительности понятие точки перехода является не строго определенным. Но, несмотря на условность самого определения, важно теоретически предсказать ее местоположение. Ряд методов основан на тэйлоровской модели возникновения турбулентности как результате образования локальных отрывов, что может иметь место при большой степени турбулентности. Другая группа методов расчета основана на использовании модельных уравнений развитого турбулентного течения. Не вдаваясь в обсуждение достоинств и недостатков этих и некоторых других подходов к решению задачи предсказания перехода, отметим, что наиболее обоснованными с физической точки зрения являются методы, базирующиеся на концепции гидродинамической неустойчивости течения.

Предсказание точки перехода, определенной тем или иным способом, должно включить в себя три основных элемента: 1) определение состава начальных возмущений в пограничном слое, возбуждаемых различными внешними возмущениями, то есть решение проблемы восприимчивости; 2) расчет линейного развития малых возмущений (волны Толлмина–Шлихтинга) в пограничном слое; 3) определение и расчет доминирующих нелинейных процессов, приводящих к тому или иному явлению (трехмерное искажение плоских волн, начало вторичной неустойчивости, начало бурного роста всех возмущений, существенное искажение профиля средней скорости и т.п.), характеризующему начало разрушения ламинарного течения. Говоря об определении начального состава возмущений в пограничном слое, отметим, что в настоящее время только в некоторых частных случаях это можно сделать.

Методы расчета линейного развития возмущений в пограничном слое (второй элемент) развиты лучше всего. Адекватность описания процесса развития волн Толлмина–Шлихтинга (Т–Ш) с помощью линейной теории гидродинамической устойчивости подтверждена экспериментально.

Для осуществления третьего основного элемента предсказания точки перехода до сих пор нет никаких рациональных методов, так как механизмы даже отдельных нелинейных процессов изучены не

полностью. Возможно, решение этой проблемы будет найдено на пути интегрирования полных трехмерных уравнений Навье–Стокса, но это дело будущего. Однако, хотя полная теория перехода должна включить в себя область нелинейных эффектов, некоторые обстоятельства позволяют ее обойти при практических расчетах положения точки перехода.

Экспериментальные данные показывают, что нелинейные процессы, дающие начало разрушению ламинарного течения, протекают очень быстро и на большой части (90–95%) протяженности пограничного слоя от начала его развития до точки перехода происходит развитие малых возмущений, описываемое линейной теорией гидродинамической устойчивости. Это дает возможность при надлежащем выборе критерия перехода использовать линейную теорию для предсказания точки перехода, пренебрегая деталями нелинейных процессов.

### Методы воздействия на среднее течение

Потенциальная возможность существенного снижения сопротивления 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, собственных колебаний, волн Толлмина–Шлихтинга. Методы управления имеют целью создать такие условия, при которых течение в пограничном слое было бы более устойчиво, то есть управление осуществляется воздействием (пусть достаточно малым) на среднее течение в пограничном слое. Известны методы достижения этого: создание благоприятного градиента давления, охлаждение поверхности в воздухе или нагрев ее в воде, отсос и т.д. Это методы, теоретической основой которых является линейная теория гидродинамической устойчивости.

Примером такого влияния является отсасывание пограничного слоя (см. [2]). В этом случае отсасывание стабилизирует ламинарный пограничный слой и уменьшение сопротивления достигается в результате предупреждения перехода ламинарной формы течения в турбулентную. Действие отсасывания проявляется двояким образом: во-первых, отсасывание уменьшает толщину пограничного слоя, а более тонкий пограничный слой имеет меньшую склонность к переходу в турбулентное состояние, чем толстый пограничный слой; во-вторых, отсасывание ламинарного пограничного слоя создает в нем такие профили скоростей, которые обладают более высоким пределом устойчивости, то есть более высоким критическим числом Рейнольдса, чем профили скоростей в пограничном слое без отсасывания.

Рассмотрим случай равномерного распределенного отсасывания. В этом случае важное значение

имеет вопрос о количестве среды, которое необходимо отсасывать для сохранения пограничного слоя ламинарным. Увеличением количества отсасываемой среды можно сделать толщину пограничного слоя чрезвычайно малой и всегда меньшей предела устойчивости. Однако увеличение количества отсасываемой среды невыгодно экономически, так как при чрезмерном отсасывании значительная часть мощности, сэкономленной благодаря уменьшению сопротивления, вновь расходуется на это чрезмерное отсасывание. В связи с этим весьма важно определить минимальное количество отсасываемой среды, достаточное для сохранения пограничного слоя ламинарным. Это минимальное количество отсасываемой среды одновременно обеспечивает и максимальное уменьшение лобового сопротивления, достигаемого посредством отсасывания. В самом деле, любое большее количество отсасываемой среды создает тонкий пограничный слой, а вместе с тем и большее касательное напряжение на стенке.

Приведенные результаты расчетов по влиянию отсасывания на кривые нейтральной устойчивости убедительно свидетельствуют о весьма эффективном стабилизирующем действии отсасывания. Таким образом, течение в пограничном слое при отсасывании сохраняется ламинарным не только благодаря уменьшению толщины слоя, но также, и притом в гораздо большей степени, благодаря повышению предела устойчивости для профилей скорости.

#### **Методы подавления и усиления собственных возмущений**

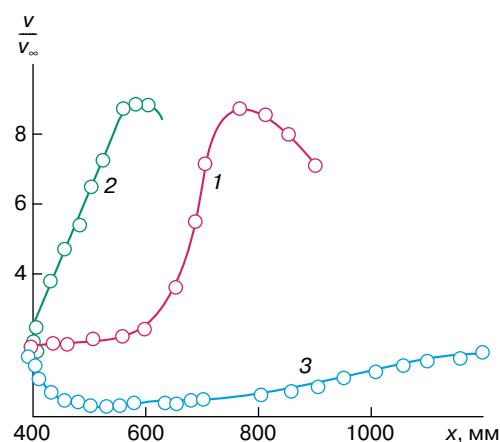
Как уже было сказано выше, эффективным является управление ламинарно-турбулентным переходом при воздействии на средние течения. В какой-то мере альтернативным путем управления переходом, более эффективным с энергетической точки зрения, является воздействие не на средний поток, а на сами возмущения, то есть развивающуюся волну можно усилить или подавить с помощью волны той же природы с соответствующей относительной фазой. Данный путь управления переходом требует эффективных и в то же время практических 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, то есть уметь решать задачу с начальными данными.

Приведем пример такого воздействия на ламинарно-турбулентный переход, вызванный вибрирующей ленточкой, когда воздействие осуществлялось порождением дополнительной волны с помощью периодического вдува—отсоса. В случае малых амплитуд возмущений можно наблюдать, что при сдвиге фаз одной волны относительно другой, равном  $180^\circ$ , происходит интенсивное подавление волны

неустойчивости, вызванной колебаниями ленточки. На рис. 4 приведены кривые нарастания амплитуд возмущений для этого же случая, когда амплитуды обеих волн были увеличены на порядок, чтобы произошел контролируемый переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный. Видно, что при вычитании двух колебаний ламинарно-турбулентный переход на пластине не наблюдается совсем.

В принципе активное управление включает в себя датчики, анализаторы и активаторы. Непосредственное активное управление неустойчивостью существенно отличается от многих предшествующих попыток задержки перехода, которые основаны на изменении профиля средней скорости (например, отсосом пограничного слоя). При подходе, связанном с управлением неустойчивостью, уничтожаются или по крайней мере уменьшаются по амплитуде развивающиеся возмущения путем использования принципа суперпозиции. Для управления ламинарно-турбулентным переходом можно использовать любые способы возбуждения волн в пограничном слое, если переход связан с явлением линейной неустойчивости. Для этого нужно создать устройство (активатор), которое эффективно генерирует другую волну той же амплитуды, но с противоположной фазой. Оценки показывают, что увеличение числа Рейнольдса перехода в воде можно получить разрушением волны Т–Ш, затратив 10 Вт электрической мощности, тогда как, чтобы достичь того же эффекта при идентичных условиях течения, используя непрерывный нагрев поверхности, необходимо 2000 Вт.

Управление ламинарно-турбулентным переходом в пограничных слоях разрушением волн было



**Рис. 4.** Управление ламинарно-турбулентным переходом: 1 – переход, вызываемый естественной волной неустойчивости; 2 – переход, вызываемый волной неустойчивости при периодическом вдуве-отсосе от ряда отверстий в фазе с естественной волной; 3 – волна от ряда отверстий в противофазе с естественной волной

предметом многих недавних экспериментов и симуляций (см., например, [3]). В этих работах возмущения в пограничном слое возбуждались вибрирующей лентой, системой нагревательных элементов или звуком. Управляющая волна, созданная вторым волнообразователем, расположенным ниже по потоку, например вибрацией поверхности, используется для минимизации амплитуды первичной волны Т–Ш в пограничном слое путем введения управляющей волны подходящей амплитуды, но при этом была выявлена важность выбора подходящего активатора. Так, вибрирующая лента не идеальный активатор, поскольку обладает инерцией, и введение любых поперечных модуляций затруднено. Периодический вдув—отсос через маленькие отверстия, нагрев системой вделанных в поверхность элементов или локализованные вибрации — потенциально более обещающие активаторы.

В подходе, описанном выше, основным предположением является то, что естественные волны имеют некоторые доминантные возмущения, которые можно характеризовать волнами. Предполагается, что эти неустойчивости характеризуются дискретными частотами в спектре. В этом случае спектральный контроллер должен знать распределение энергии по частотам и (для трехмерных волн) пространственное волновое число. Для двумерных возмущений можно использовать лишь один датчик, где сама геометрия предопределяет доминирование двумерных волн, тогда как для контроля даже простейших наклонных плоских волн, чтобы определить их фазы, амплитуду и наклон, нужно использовать два датчика. Как видно, простое разрушение волн имеет смысл только тогда, когда возмущения все еще относительно малы, их рост определяется линейным уравнением и применим принцип суперпозиции.

Из сказанного следует, что необходимо изучить применимость этого метода для управления произвольным трехмерным полем возмущений. Кроме того, нужны исследования для оценки применимости метода в присутствии различных начальных условий, представляющих альтернативные пути для ламинарно-турбулентного перехода (так называемые обходные пути перехода). За линейной стадией исходные двумерные волны неизбежно вызывают почти-периодические поперечные модуляции, в результате вторичной неустойчивости развиваются мелкомасштабные трехмерные структуры и, наконец, происходит окончательный переход. Неудивительно, что для достижения существенной задержки перехода на этой нелинейной стадии или в трехмерных течениях использование методов разрушения волн требует применения большого количества детекторов возмущений и сложной системы управления, которая может разрушить как первичные, так и остаточные возмущения.

## Микроэлектромеханические системы

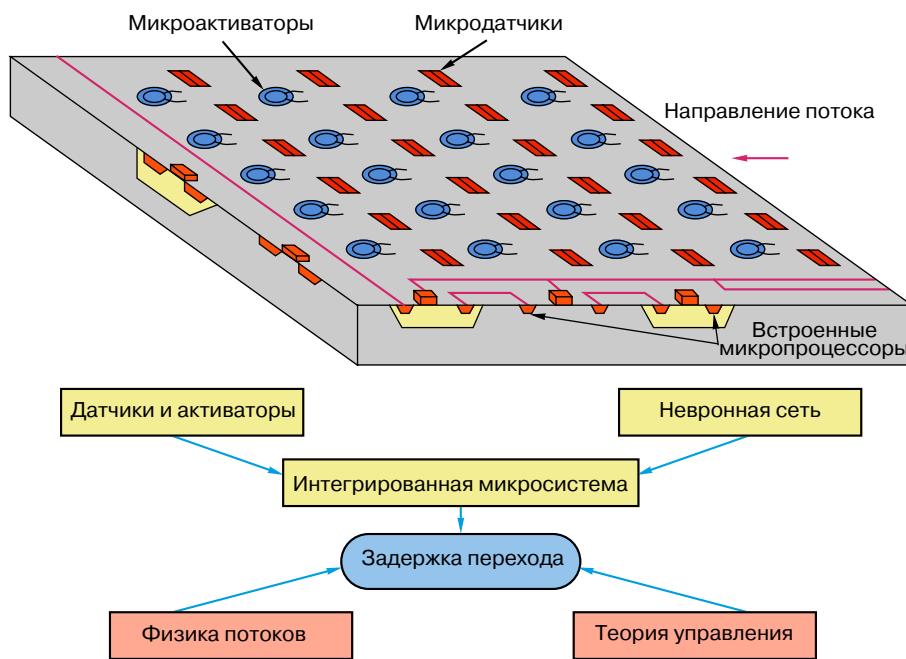
Уменьшение сопротивления в (почти-)турбулентном пограничном слое и задержка ламинарно-турбулентного перехода — огромный вызов исследованиям в механике сред. Соответствие масштабам длин между активаторами и контролируемыми явлениями — основное требование в этих случаях. В существующих методах управления было невозможно идентифицировать структуры и провести выборочное управление ими в реальном времени.

Микромашинная технология [4, 5] является новейшей областью техники, которая позволяет производить механические части и целые устройства микронных размеров (рис. 5). Для механики жидкости и газа эта технология дает возможность создавать микродатчики и микроактиваторы для управления течением. Их масса, теплопроводность и другие инерциальные характеристики очень малы. Таким образом, удовлетворяется основное требование к датчикам и активаторам — отклик на высокие частоты. Более того, можно достичь интерактивного распределенного управления соединением на одной поверхности микродатчиков, микроактиваторов и микропроцессоров (невронная сеть) для создания интегрированной системы.

Такая система имеет на поверхности датчики напряжения сдвига, улавливающие локализованные вихри возмущений в нелинейной области пограничного слоя, встроенную невронную сеть для обработки сигналов в соответствии с алгоритмом распознавания образов и набор магнитных закрылок 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. В то же время набор микроактиваторов способен контролировать макрообъект при условии существования подходящего механизма управления. Например, можно использовать линейный набор выдвижных линейных активаторов для создания врачающего момента на модели бесхвостового дельтовидного крыла применяя известный механизм из теории дельтовидного крыла, позволяющий микроактиваторам иметь усиленный макроэффект.

Таким образом, теория гидродинамической устойчивости и экспериментальное моделирование в настоящее время являются мощными средствами в исследовании динамики жидкости и газа. Они позволяют выявить и исследовать наиболее сложные явления ламинарно-турбулентного перехода и являются основой для наиболее современных стратегий управления переходом.

До сих пор способы управления для пристенных течений были сконцентрированы на пассивных подходах. Устройствами такого типа можно было



**Рис. 5.** Схема активного контроля процесса перехода к турбулентности с использованием микроэлектромеханических систем

пытаться подавить формирование или взаимодействие организованных структур в течении. Эти устройства играют пассивную роль в том смысле, что не существует цепи обратной связи для детектирования и манипулирования структурами в течении. Современные работы направлены на активное управление динамическими структурами для достижения задержки перехода или уменьшения поверхностного трения. Стратегия управления реализуется через цепь обратной связи при изменении структур в потоке.

Микроэлектромеханические системы имеют дело с явлениями в специфическом микронном масштабе расстояний. Многие интересные научные проблемы необходимо понять в микромеханике сред. В частности, управляющие механизмы, включающие отношение масштабов длин, меняются и многие фундаментальные предположения оказываются под вопросом. Наиболее интересно то, что мы сможем осуществлять интерактивное управление в реальном времени фактически случайных событий и эксплуатировать явления за пределами разрешения традиционных устройств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 730 с.
2. Качанов Ю.С., Козлов В.В., Левченко В.Я. Возникновение турбулентности в пограничном слое. Новосибирск: Наука, 1982. 151 с.

3. Kozlov V.V., Levchenko V.Ya. Laminar-Turbulent Transition Control by Localized Disturbances // Turbulence Management and Relaminarisation / Ed. H.W. Liepmann, R. Narasimha. B. etc.: Springer, 1988. P. 240–269.

4. Ho Ch.-M. Interaction between Fluid Dynamics and New Technology // Proc. I Conf. Interaction of Sci. and Art / Ed. N.W.M.Ko et al. Hong-Kong, 1994. P. 1–8.

5. Ho Ch.-M., Tai Yu-Ch. MEMS: Science and Technology //ASME FED. 1994. Vol. 197. Application of Microfabrication to Fluid Mechanics. P. 39–48.

\* \* \*

Виктор Владимирович Козлов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры аэрофизики и газовой динамики Новосибирского государственного университета, зав. лабораторией аэрофизических исследований дозвуковых течений Института теоретической и прикладной механики Сибирского отделения РАН. Награжден серебряной медалью им. Н.Е. Жуковского “За лучшую работу по теории авиации” за 1992 год. Область научных интересов – экспериментальное изучение гидродинамической устойчивости течений, возникновения турбулентности, физики отрывных течений, когерентных структур в турбулентных потоках. Автор более 200 научных работ, в том числе одной монографии.