

PHYSICS OF FLOW STRUCTURES. FLOW SEPARATION

V. V. KOZLOV

Flow separation, one of fundamental phenomena of fluid mechanics, is considered. Influence of parameters modifying physical nature of the separation is described and significance of flow hydrodynamic instability for formation of separation type is demonstrated.

Рассмотрено одно из фундаментальных явлений механики жидкостей и газа – явление отрыва потока. Описано влияние некоторых факторов, изменяющих физическую структуру отрыва, и показана важность гидродинамической неустойчивости течения для формирования вида отрыва.

ОТРЫВ ПОТОКА

В. В. КОЗЛОВ

Новосибирский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

Аэродинамические характеристики летательного и плавательного аппаратов определяются особенностями их обтекания – относительного движения окружающей среды (газа или жидкости). В их числе одно из фундаментальных явлений механики жидкости и газа – отрыв потока. Оно заключается в том, что при определенных условиях (например, неблагоприятном градиенте давления) среда вблизи обтекаемого тела перестает двигаться вдоль его поверхности и отходит от нее. В результате образуется область оторвавшегося течения или зона отрыва, появление которой сказывается на маневренности, управляемости и аэродинамической эффективности транспортного средства.

Особый интерес представляет отрывное обтекание несущих поверхностей – крыльев летательных и плавательных аппаратов. В зависимости от скорости движения, формы крыла и угла, под которым оно расположено относительно воздушного потока, называемого углом атаки крыла, поведение оторвавшегося течения различно. При отрыве стационарного маловозмущенного, ламинарного, течения оторвавшийся поток может вновь присоединиться к поверхности крыла. При этом возникает местная зона отрыва (отрывной пузырь), которая имеет небольшие размеры по сравнению с размерами самого крыла (рис. 1, а). В этом случае отрывная область на крыле существует в виде узкой полосы, вытянутой вдоль его размаха.

Положение отрывного пузыря на крыле зависит от угла атаки. При его увеличении зона отрыва сдвигается ближе к передней кромке крыла, в задней части которого возникает еще один отрыв нестационарного вихревого, турбулентного, течения. Его схема показана на рис. 1, б. При турбулентном отрыве не происходит повторного присоединения оторвавшегося потока к поверхности крыла и зона отрыва включает всю область течения от линии отрыва до задней кромки крыла.

При дальнейшем увеличении угла атаки и достижении им критического значения возникает отрыв потока с передней кромки, называемый также срывом, глобальным или полным отрывом, схема которого приведена на рис. 1, в. Срыв потока сопровождается резким снижением подъемной силы крыла, увеличением его сопротивления и приводит к неблагоприятным, вплоть до катастрофических, последствиям.

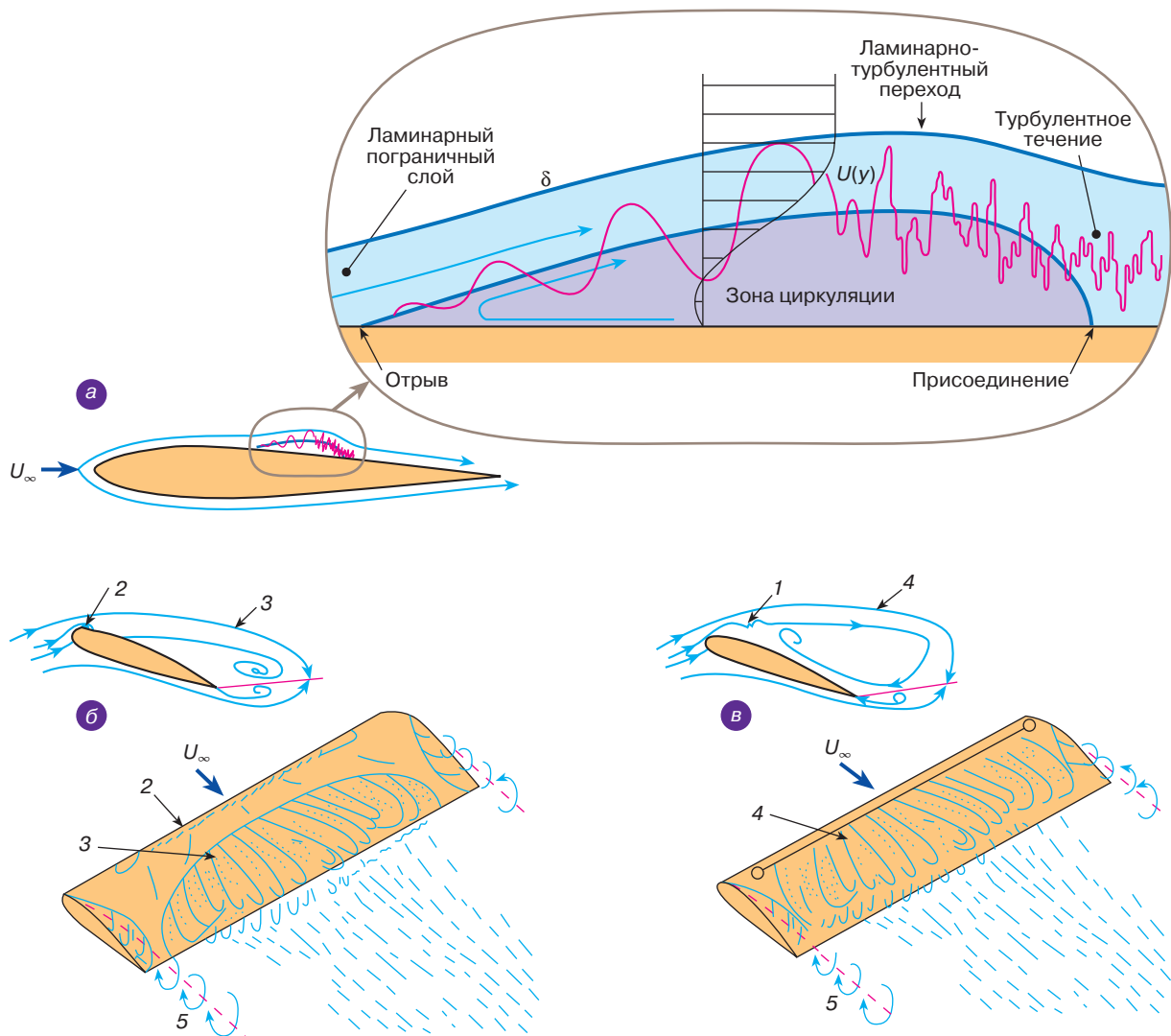


Рис. 1. Схемы отрывных течений над верхней поверхностью крыла: 1 – переход от ламинарного течения к турбулентному, 2 – зона ламинарного отрыва, 3 – область отрыва турбулентного течения, 4 – область срыва потока, 5 – вихри по концам крыла

Отрывное обтекание крыльев изучается на протяжении многих лет с целью совершенствования методов прогнозирования подобных течений и разработки способов целенаправленного воздействия на них, то есть управления отрывом потока. Простейшие физические модели отрыва предполагают двумерность течения, то есть его независимость от одной из пространственных координат (в данном случае вдоль передней кромки крыла). В результате исследований, проведенных в последнее время, стала очевидна ограниченность такой идеализации: при турбулентном отрыве и срыве потока с передней кромки в отрывной зоне образуются крупномасштабные вихри, расположенные вдоль размаха крыла, с которыми связано интенсивное движение газа в поперечном направлении. Существование та-

ких вихрей принципиально изменяет физическую картину течения по сравнению с той, которая рассматривается в двумерных задачах отрыва потока.

Остановимся вначале на структуре локализованных отрывных пузырей, то есть на первом случае.

СТРУКТУРА ЛОКАЛЬНЫХ ЗОН ОТРЫВА (ОТРЫВНЫХ ПУЗЫРЕЙ)

Как уже было сказано выше, в зависимости от скорости движения, формы крыла и угла, под которым оно расположено относительно потока, поведение оторвавшегося течения различно. При отрыве стационарного ламинарного течения оторвавшийся поток может вновь присоединиться к поверхности крыла. При этом возникает местная зона отрыва,

или отрывной пузырь (см. [2]), которая обычно имеет небольшие размеры по сравнению с размерами самого крыла (см. рис. 1, а). В этом случае отрывная область на крыле существует в виде узкой полосы, вытянутой вдоль его размаха. В то же время в ней ярко проявляется фундаментальное свойство отрывных течений — *гидродинамическая неустойчивость* [1]. То есть неустойчивость возмущений малой амплитуды вызывает ламинарно-турбулентный переход и как следствие — сильное перемешивание жидкости, приводящие к присоединению потока к поверхности. Таким образом, в данном случае отрывная зона формируется в переходном режиме, то есть при переходе к турбулентности в пределах области отрыва или вблизи нее. Упрощенная схема включает в себя отрыв ламинарного пограничного слоя, последующий переход к турбулентности и присоединение турбулизованного потока.

Как известно, с физической точки зрения процесс перехода ламинарного течения в турбулентное состояние при малой интенсивности внешних возмущений состоит из трех условно разделяемых этапов: генерации волн сдвигового слоя, их усиления по законам линейной теории и нелинейного разрушения ламинарного режима течения. Каждому этапу в перечисленной последовательности соответствует характерная область в пространстве по мере возрастания расстояния от передней кромки модели. Отметим, что последняя, нелинейная область развития процесса перехода относительно малопротяжена и характер ее в значительной степени определяется свойствами исходного течения, внешних возмущений и процессами, происходящими в предыдущих двух областях.

Рассмотрим вначале неустойчивость локальных отрывных зон к возмущениям малых амплитуд.

Линейная устойчивость отрывных течений

Прежде чем обратиться к собственно характеристикам устойчивости течений, необходимо отметить особенность локальных областей отрыва, отличающую их от других течений типа пограничного слоя в отношении применимости линейной теории. В переходном режиме поле скорости во всей области отрыва, в том числе на ее ламинарном участке, где развиваются волны неустойчивости, зависит от возмущенного течения ниже по потоку в зоне перехода и присоединения оторвавшегося слоя. Вследствие этого возбуждение колебаний малых амплитуд сопровождается изменением средних характеристик течения, величина которого зависит от амплитуды колебаний. В итоге нарушается исходное положение линейной теории, в которой исследуются характеристики возмущений, наложенных на заданное среднее во времени течение.

Эксперименты показали, что, несмотря на указанное обстоятельство, характеристики волн неустойчивости оказываются не зависящими в пределах

точности определения от амплитуды колебаний при ее малой величине и в этом отношении возмущения развиваются линейно по амплитуде. Это парадоксальное свойство объясняется тем, что в зоне отрыва доминирует неустойчивость слоя смещения, формирующегося на границе области циркуляции, который сам по себе консервативен, а искажение возмущениями малых амплитуд среднего течения сводится по существу к изменению расстояния от слоя смещения до обтекаемой поверхности, а форма профиля скорости в окрестности точки перегиба (чем и определяется неустойчивость профиля) у границы отрывного пузыря при возбуждении течения практически не изменяется, то есть в начальной стадии усиления колебания ведут себя как линейные волны. Особенностью дисперсионных характеристик волн неустойчивости для данного течения является слабая зависимость фазовой скорости распространения от частоты двумерных колебаний и продольного волнового числа от направления фазового фронта плоских трехмерных волн.

Возбуждение колебаний малой амплитуды возмущениями внешнего потока

В линейной теории устойчивости, применение которой к локальным областям отрыва обсуждалось в предыдущем разделе, не рассматривается вопрос о происхождении колебаний малых амплитуд, приводящих к турбулизации течения. Развитие возмущений на линейной стадии связывается с внешними относительно рассматриваемого течения условиями задачи о возбуждении волн неустойчивости. В исследованиях ламинарно-турбулентного перехода в открытых системах она формулируется в виде отдельного вопроса, который называется проблемой восприимчивости. В ее рамках изучаются механизмы преобразования возмущений внешнего потока в собственные колебания сдвиговых течений с конечной целью определения начальных амплитуд волн неустойчивости, что необходимо для более точного предсказания перехода к турбулентности в каждом конкретном случае.

Выделение проблемы восприимчивости в качестве самостоятельной задачи при исследовании процесса возникновения турбулентности имеет смысл в случае конвективной (сносовой) неустойчивости течения. Применение аналогичного подхода к отрывным течениям предполагает, таким образом, что и в этом случае конвективная неустойчивость является доминирующим механизмом процесса турбулизации. Результаты, полученные в эксперименте, оправдывают это представление для рассматриваемых в настоящей статье локальных отрывных зон, возникающих при низких дозвуковых скоростях потока.

Основными источниками собственных возмущений сдвигового слоя в течениях несжимаемого газа являются акустические колебания, возмущения

завихренности набегающего потока и вибрации поверхности.

Эксперименты по возбуждению волн неустойчивости в локальных областях отрыва пограничного слоя акустическими возмущениями внешнего потока показывают, что генерация колебаний может идти различными путями в зависимости от условий возникновения отрыва. Способы возбуждения включают генерацию возмущений завихренности в пограничном слое выше по потоку точки отрыва с последующей их трансформацией в волны неустойчивости отрывного течения и порождение последних в окрестности самой точки отрыва.

Задача, в которой реализуется первый путь возбуждения, — отрыв пограничного слоя от гладкой поверхности на участке распределенного положительного градиента давления во внешнем потоке. В этом случае колебания проникают в отрывную зону из предотрывного пограничного слоя, тогда как генерация вблизи самой точки отрыва не регистрируется.

В отношении способов возбуждения отрыв на локальных геометрических неоднородностях обтекаемой поверхности представляет собой иной случай, в котором возбуждение колебаний может осуществляться по тому и другому пути.

Нелинейные эффекты в области отрыва потока

Линейное приближение, используемое для описания начального этапа процесса перехода к турбулентности в условиях низкой возмущенности набегающего потока, неприменимо с ростом амплитуды колебаний в направлении течения. За областью их линейного усиления следует нелинейная стадия, где компоненту возмущения ламинарного течения нельзя более рассматривать как суперпозицию линейно-независимых колебаний и ее характеристики определяются нелинейными эффектами — волновыми взаимодействиями. В спектральном представлении процесс перехода в зоне отрыва пограничного слоя, его нелинейный этап, начинается с разрушения пакета колебаний в частотном спектре пульсаций, сформированного в области линейной неустойчивости. На участке протяженностью порядка длины волны колебаний, обладающих максимальным инкрементом в линейной области, происходит переход от возмущенного ламинарного течения к турбулентному, и это выглядит как превращение пакета волн неустойчивости в широкий спектр пульсаций.

В целом здесь можно выделить следующие основные явления на нелинейной стадии процесса перехода в локальных областях отрыва ламинарного пограничного слоя: пути разрушения ламинарного течения, как и при переходе к турбулентности в других слоях сдвига, включают наряду с другими возможными механизмами стохастизации резонансное возбуждение субгармоники колебаний, усиленных на предшествующем этапе линейной не-

устойчивости, и комбинационные взаимодействия гармоник частотного спектра. Особенность субгармонического возбуждения, обусловленная дисперсионными характеристиками течения в зоне отрыва, заключается в том, что при резонансе происходит усиление колебаний в широком спектре частот и волновых чисел: как двумерной компоненты, так и плоских трехмерных волн.

Характер перехода к турбулентности зависит от начальных условий — спектра пульсаций, формирующегося в конце участка линейного развития колебаний. Указанные выше свойства проявляются в процессе турбулизации, протекающем при относительно однородном (без интенсивных гармонических компонент) начальном спектре возмущений. В условиях монохроматического возбуждения волн неустойчивости достаточно большой начальной амплитуды может реализоваться другой режим течения, в котором нарушается соответствие между различными критериями перехода, генерация компонент сплошного спектра подавляется и течение становится более регулярным по сравнению со случаем однородного начального спектрального распределения. При этом процесс перехода на этапе развития нелинейного детерминированного возмущения до начала усиления пульсационного фона протекает в двумерном течении.

Эффекты обратной связи в областях отрыва пограничного слоя

Общим свойством переходных отрывных течений является зависимость поля скорости во всей зоне отрыва, включая ее ламинарный участок, от перехода к турбулентности, который происходит в пределах отрывной области или вблизи нее. В частности, влияние процесса перехода вверх по потоку выражается в искажении профилей скорости среднего течения при возбуждении волн неустойчивости, о чем говорилось выше, то есть колебания малых амплитуд, возбужденные в зоне отрыва тем или иным способом, воздействуют на процесс ламинарно-турбулентного перехода и течение в районе присоединения оторвавшегося слоя. Вызванное этим возмущение распространяется на всю отрывную зону, что ведет к изменению распределения скорости среднего течения, которое может на порядок величины превышать локальный в том же сечении по продольной координате максимум амплитуды возбужденных колебаний.

В простейшей интерпретации данный эффект рассматривается как результат зависимости поля течения от положения перехода к турбулентности за точкой отрыва. Вместе с тем представление о точке перехода является упрощением, целесообразным в первую очередь в технических приложениях, тогда как физический смысл имеет процесс перехода в протяженной области, который формирует течение в отрывной зоне.

Результаты исследований в этой области приводят к следующим основным заключениям: модель обратного влияния возмущенного течения в переходной области отрыва пограничного слоя, подразумевающая корреляцию средних во времени характеристик отрывного течения с положением перехода к турбулентности, можно расценивать как первое приближение к физической картине течения. В экспериментах получено свидетельство того, что среднее течение в области отрыва не имеет однозначной связи с координатой точки перехода, а зависит от самого процесса перехода к турбулентности, сопровождающего отрыв пограничного слоя.

Зависимость среднего течения в локальных областях отрыва от развивающихся в них возмущений, присущая переходным отрывным течениям, может иметь место и в чисто ламинарных течениях, то есть без перехода к турбулентности в пределах отрывной зоны либо вблизи нее. В этих условиях эффект связан с нарастанием волны неустойчивости, достигающей нелинейной амплитуды в районе присоединения оторвавшегося слоя. Изменение среднего течения в данном случае, очевидно, не столь велико, как в переходных режимах, и не вызывает значительных с точки зрения инженерных приложений изменений интегральных аэродинамических характеристик обтекаемого тела. Тем не менее в связи с развитием фундаментальных представлений о свойствах отрывных течений этот факт заслуживает внимания, поскольку означает, что характеристики ламинарного и одновременно неустойчивого течения в зоне отрыва необязательно идентичны предсказанным в рамках стационарных моделей отрыва потока.

Наряду с воздействием колебаний на распределение скорости среднего течения эффект обратного влияния есть также зависимость частотного спектра колебаний вблизи точки отрыва от возмущенного течения ниже по потоку. Нарушение суперпозиции возбуждаемой волны неустойчивости со спектром фоновых пульсаций — особенность процесса перехода к турбулентности в областях отрыва пограничного слоя, отличающая их от других конвективно неустойчивых сдвиговых течений.

В целом необходимо отметить, что в описанном выше случае зоны оторвавшегося потока двумерны, но их топология глобально меняется в случае больших углов атаки.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА КРЫЛЬЯХ ПРИ БОЛЬШИХ УГЛАХ АТАКИ

Более десяти лет назад было установлено [3], что при отрыве потока на прямом крыле (имеющем прямоугольную форму в плане с передней кромкой, расположенной перпендикулярно направлению потока) в области отрыва возникают грибообразные структуры, каждая из которых представляет со-

бой пару крупномасштабных вихрей, вращающихся в плоскости крыла в противоположные стороны. Трехмерная вихревая структура течения над поверхностью крыла показана на рис. 2, где приведены фотографии визуализаций обтекания при последовательном увеличении угла атаки экспериментальной модели; воздушный поток направлен на рисунке сверху вниз. При минимальном угле атаки, равном $9,1^\circ$ (рис. 2, а), около передней кромки крыла отрывается ламинарное течение и возникает узкая (локальная) область отрыва, расположенная вдоль размаха модели. Ниже по потоку течение турбулентно, его новый отрыв происходит вблизи задней кромки крыла и сопровождается образованием вихрей — на фотографии зафиксированы пять хорошо различимых вихревых пар. С увеличением угла атаки их число уменьшается в результате слияния вихрей, а характерный масштаб растет. При угле атаки $12,3^\circ$ (рис. 2, б) наблюдаются три вихревые пары, при $16,8^\circ$ (рис. 2, в) — две, а при $18,4^\circ$ (рис. 2, г) — только одна. Дальнейшее возрастание угла атаки приводит к радикальной перестройке режима обтекания крыла: вместо отрывного пузыря у передней кромки и последующего турбулентного отрыва возникает срыв потока (рис. 2, д). В этом режиме течения формирование отрывной зоны связано с развитием в оторвавшемся слое газа собственных колебаний, вызывающих его переход из ламинарного состояния в турбулентное, о чем шла речь в первой части, и срыв потока отличается по существу происходящих при этом физических явлений от отрыва турбулентного течения. Между тем для топологии отрывного течения также характерна пара вихрей, вращающихся в плоскости крыла. По сравнению со случаем турбулентного отрыва их фокусы меняют свое положение, сдвигаясь против направления потока.

Таким образом, реальное течение в отрывной области даже в тех геометрических условиях, которые можно считать близкими к двумерным, оказывается трехмерным и имеет сложную внутреннюю пространственную структуру. Полученные в эксперименте данные, аналогичные приведенным на рис. 2, позволяют установить ее зависимость от условий возникновения отрыва потока. Один из возможных механизмов образования трехмерных вихревых структур при двумерном отрыве потока был предложен несколько лет назад и заключается в следующем: при сходе потока с передней и задней кромок крыла образуются вихри, оси которых параллельны его размаху (рис. 3, а). Эта вихревая система неустойчива (не путать с гидродинамической неустойчивостью профиля средней скорости), вихри деформируются (рис. 3, б), происходит их перезамыкание, и в итоге появляются трехмерные структуры (рис. 3, в). Их «отпечаток» на поверхности крыла имеет грибообразную форму (рис. 3, г), наблюдаемую в эксперименте.

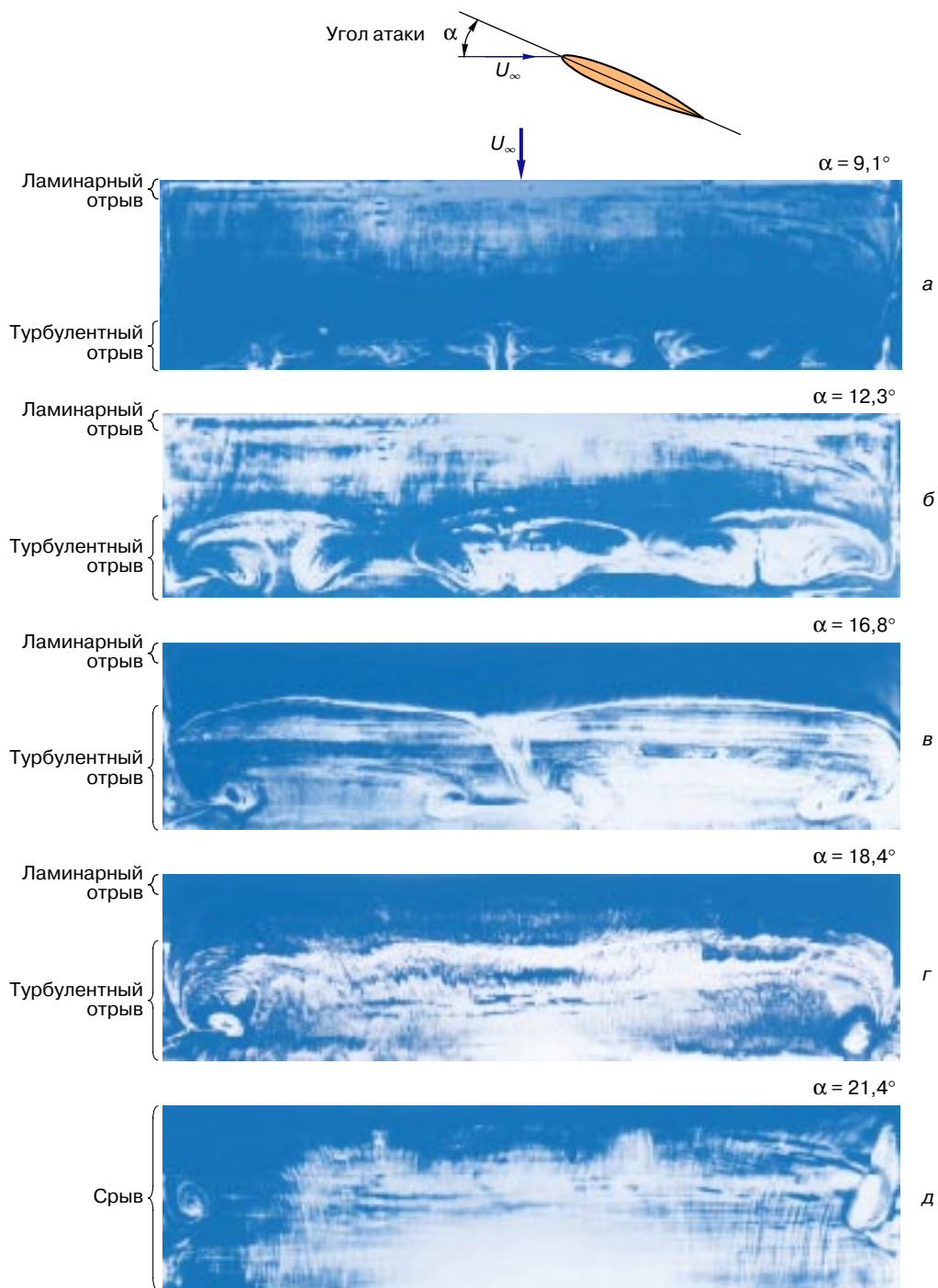


Рис. 2. Влияние угла атаки на структуру течения в области турбулентного отрыва

Структура течения в условиях управления срывом потока

Смысл управления отрывом потока сводится (следуя [4]) в большинстве случаев к его предотвращению либо уменьшению размеров отрывной зо-

ны, для чего применяются методы, основанные на различных физических принципах. Требуемый результат управления может быть получен, в частности, искусственным перемешиванием газа вблизи обтекаемой поверхности (при ламинарном отрыве приведением оторвавшегося течения в турбулентное

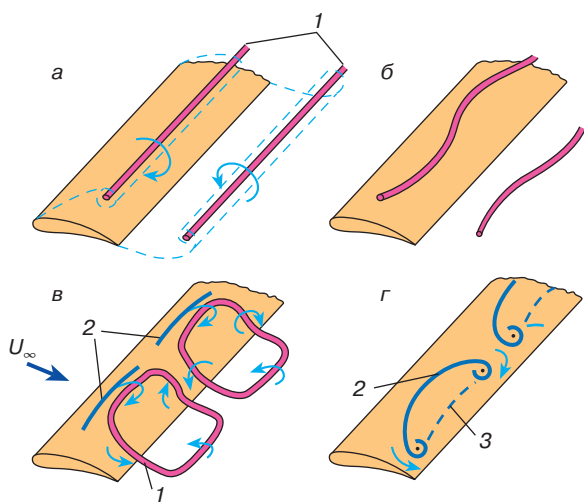


Рис. 3. Схема возникновения вихревых структур в области отрыва: 1 – оси вихрей, 2 – линия отрыва, 3 – линия присоединения

состояние), которое увеличивает сопротивляемость течения причинам, вызывающим отрыв потока. При срыве потока с передней кромки крыла для этого используются различные устройства – турбулизаторы, размещаемые на поверхности крыла вблизи линии отрыва, и возбуждение колебаний в пристенной области течения. В числе возможных

способов генерации колебаний – облучение крыла акустическими волнами. Ниже изложены результаты, в которых показано, каким образом применение указанных выше способов управления срывом потока сказывается на пространственной структуре течения.

Воздействие акустических колебаний на отрывное обтекание крыла

Впервые предотвращение срыва потока с передней кромки крыла при возбуждении акустических колебаний проводилось в представлении о двумерности течения, и был установлен физический механизм воздействия колебаний на отрывное течение [5]. В результате данный способ управления достаточно хорошо изучен.

На рис. 4 изображены схемы течения вблизи поверхности крыла, полученные в последнее время. Возбуждение в потоке пространственно-однородного акустического поля от удаленного источника колебаний вызывает присоединение оторвавшегося течения. В результате срыв потока с передней кромки сменяется отрывом турбулентного течения ниже по потоку (рис. 4, а, б). При этом обтекание крыла остается симметричным относительно его центрального сечения и вихревая структура течения соответствует той, которая формируется при турбулентном отрыве (рис. 2, г). Другая ситуация возникает, когда крыло находится не в однородном, а в

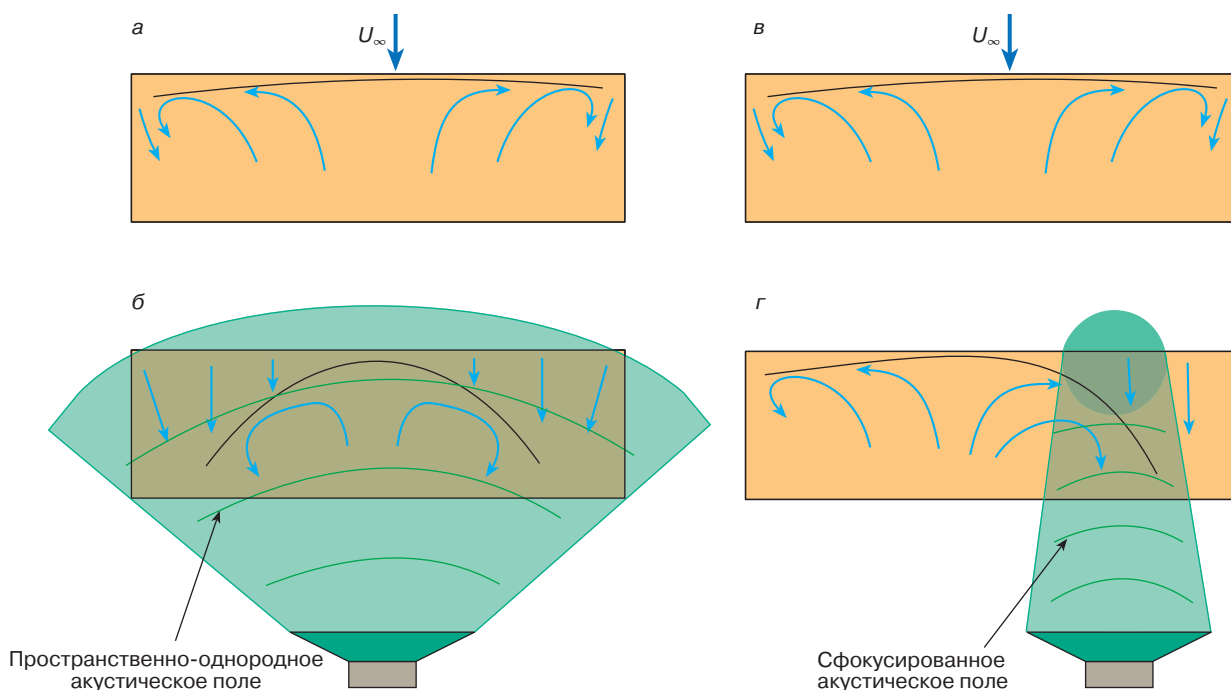


Рис. 4. Схемы течения над верхней поверхностью модели прямого крыла при различных способах акустического воздействия

сфокусированном акустическом поле. В этом случае расположение вихрей в зоне отрыва зависит от того, какая область течения подвергается воздействию. Симметрия сохраняется, когда возбуждение приложено к центральной части крыла (рис. 4, б). Если же колебания сосредоточены на краю модели, они сказываются в зоне действия одного из вихрей (рис. 4, г). Эти данные приводят к выводу, что пространственная структура течения при акустическом воздействии и результат управления срывом потока непосредственно зависят от переноса газа в поперечном направлении, несмотря на то что акустическое возбуждение колебаний оторвавшегося слоя

осуществляется вблизи передней кромки крыла, а крупномасштабное вихревое движение формируется ниже по потоку. Дальнейшее исследование этого явления представляется необходимым для построения его теоретической модели и оптимального практического использования рассмотренного метода управления отрывом.

Структура течения при глобальном отрыве в присутствии источников стационарных возмущений

Топология течения при глобальном отрыве потока на прямом крыле существенно изменяется при

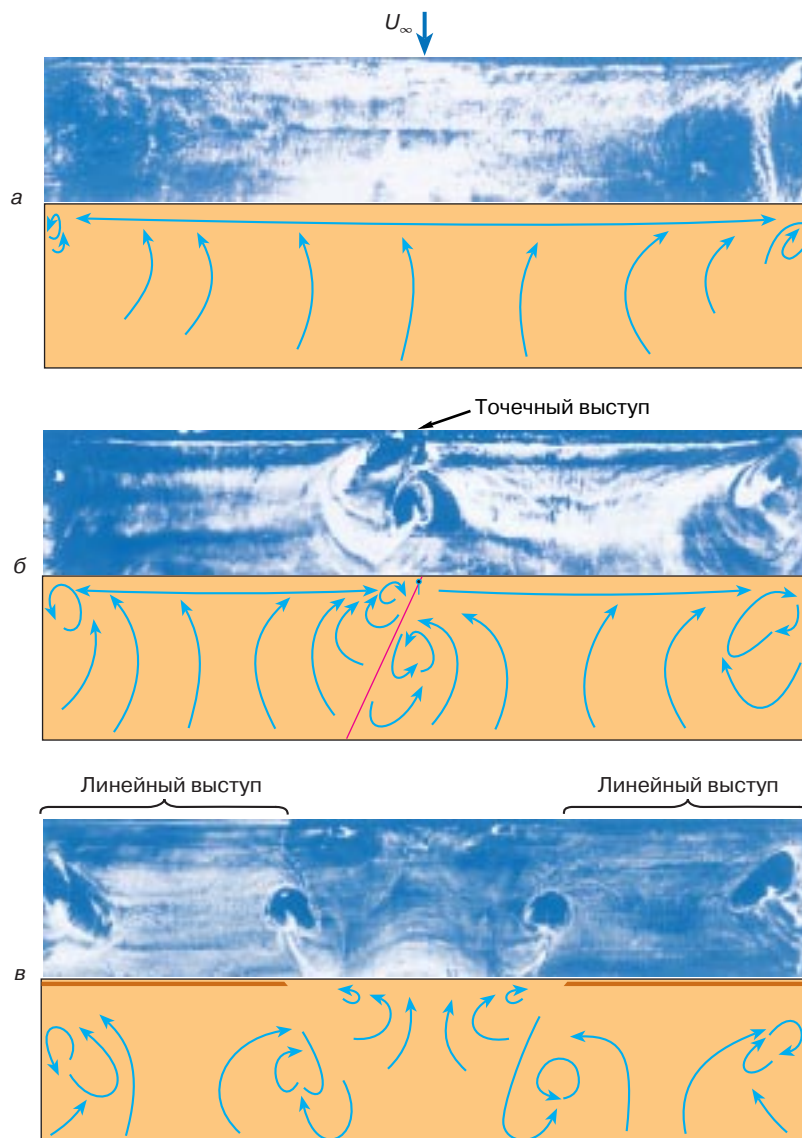


Рис. 5. Влияние выступов на передней кромке на картину течения на поверхности модели при срыве: а – модель без выступов, б – модель с точечным выступом, в – модель с двумя длинными выступами

установке вблизи его передней кромки элементов неровности поверхности различной формы. Влияние на отрывное обтекание крыла простейших в геометрическом отношении элементов — точечного и линейного, расположенного вдоль передней кромки, выступов поверхности — показано на фотографиях и схемах, интерпретирующих результаты наблюдений (рис. 5).

Картина течения с точечным выступом, помещенным в центральном сечении модели, изображена на рис. 5, б. Вихревая структура зоны отрыва заметно усложняется по сравнению со случаем обтекания гладкого крыла (рис. 5, а и 2, д). В следе за препятствием образуются два вихря, и течение на модели делится на две части справа и слева от выступа. В каждой из них наблюдается по паре вихрей, один из которых имеет фокус у края модели, а второй — около выступа. Результат установки на обтекаемой поверхности линейных выступов показан на рис. 5, в, выступы имели длину $1/3$ размаха модели каждый и располагались по краям крыла. Не приводя в данных условиях к предотвращению срыва потока, они изменяют топологию течения в отрывной области. Область отрыва делится на три части. На каждой из неровностей происходит срыв потока, и на краях выступов образуются по паре вихрей. На гладком участке поверхности крыла между выступами сохраняется часть первоначальной срывной области, и возникает пара вихрей меньшего размера с фокусами вблизи передней кромки.

Приведенные выше результаты исследований показывают, что топология трехмерного течения в области глобального отрыва потока может быть существенно изменена стационарными возмущениями — элементами неровности поверхности малой высоты, которые индуцируют в отрывной зоне дополнительные вихревые образования. Особенности трехмерной структуры течения, в свою очередь, определяют эффект, получаемый при управлении срывом потока. В частности, в экспериментах было установлено, что при комбинированном использовании элементов неровности поверхности — турбулизаторов и акустических колебаний — может происходить не полное, то есть по всему размаху крыла, а частичное присоединение оторвавшегося течения на участках поверхности крыла между отдельными выступами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование отрывного обтекания крыльев представляет собой частную, хотя и весьма важную

в практическом отношении задачу аэродинамики. Проблема отрыва потока как таковая значительно шире и включает изучение течений, возникающих в самых различных условиях. Уже получены свидетельства того, что сложный пространственный характер течения является неотъемлемым свойством областей отрыва, появляющихся и в других обстоятельствах: за острыми кромками обтекаемых тел, в окрестности уступов и выступов поверхности, на телах вращения и т. д. Дальнейшее изучение пространственных характеристик отрывных течений, вихревых структур, чувствительных к изменению условий обтекания и слабым внешним воздействиям, — перспективное направление исследований, позволяющих получить более точные по сравнению с существующими представления о фундаментальных свойствах отрывных течений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов В.В. Физические процессы в потоках // Сороковский Образовательный Журнал. 1997. № 4. С. 83–90.
2. Dovgal A.V., Kozlov V.V., Michalke A. Laminar Boundary-Layer Separation: Instability and Associated Phenomena // Progr. Aerospace Sci. 1994. Vol. 30. P. 61–94.
3. Бойко А.В., Довгаль А.В., Занин Б.Ю., Козлов В.В. Пространственная структура отрывных течений на крыловых профилях (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3, № 1. С. 1–14.
4. Чжен П. Управление отрывом потока. М.: Мир, 1979. 552 с.
5. Козлов В.В. Отрыв потока от передней кромки и влияние на него акустических возмущений // Прикл. механ. и техн. физика. 1985. № 2. С. 112–115.

* * *

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.