

03

Ламинарно-турбулентный переход в сверхзвуковом пограничном слое при иницировании импульсного поверхностного разряда

© И.А. Знаменская, Д.Ф. Латфуллин, И.В. Мурсенкова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
E-mail: dlatfullin@hotmail.ru

Поступило в Редакцию 3 декабря 2007 г.

Приведены результаты экспериментов по исследованию структуры приповерхностного течения в сверхзвуковом потоке воздуха за плоской ударной волной (число Маха потока 1.5) в канале ударной трубы при визуализации импульсным поверхностным распределенным разрядом наносекундной длительности. Показано различие структуры свечения плазменного слоя при ламинарном и турбулентном режиме течения в пограничном слое. Экспериментально определено положение области ламинарно-турбулентного перехода при плотностях потока 0.11 и 0.19 kg/m³ и оценено критическое число Рейнольдса перехода ($\sim 2.4 \cdot 10^5$).

PACS: 47.27.nb, 47.40.Ki

В связи с разработкой перспективных сверхзвуковых летательных аппаратов в настоящее время наблюдается повышенный интерес к проблеме улучшения их аэродинамических характеристик. Одной из важных задач аэродинамики является определение условий ламинарно-турбулентного перехода, поскольку переход к турбулентному режиму течения приводит к увеличению сопротивления и сильному локальному нагреву обтекаемой поверхности [1–3]. Известно, что критическое число Рейнольдса, определяющее переход от ламинарного течения к турбулентному, зависит от однородности потока, шероховатости поверхности, числа Маха потока (в случае больших скоростей) и др.

Положение области ламинарно-турбулентного перехода обычно определяется в сверхзвуковых потоках путем регистрации и обработки сигналов от тепловых датчиков или датчиков давления на обтекаемой поверхности [1,3,4]. Визуализация пограничного слоя теньевым методом

при специальной настройке теневой схемы применима в основном к двумерным течениям [4,5]. В квазистационарном свехзвуковом течении при использовании метода „лазерного ножа“ визуализируются структуры в пограничном слое значительной толщины [6]. Одним из эффективных методов визуализации структуры нестационарных трехмерных течений является регистрация интегральной свечения объемного разряда наносекундной длительности [7]. Целью данной работы было исследование пограничного слоя в свехзвуковом потоке в канале ударной трубы на основе визуализации структуры слоя свечением импульсного поверхностного скользящего разряда (плазменного листа).

Моделировать процессы, связанные с ламинарно-турбулентным переходом на стенках канала ударной трубы можно, создавая высокооднородные потоки различной скорости, плотности, температуры и изучая факторы, влияющие на этот переход.

Исследования осуществлялись на ударной трубе с разрядной секцией, подробно описанной в [7,8]. Ударная труба имеет прямоугольное сечение 24×48 mm, в ней можно создавать потоки воздуха до 1600 m/s в диапазоне плотностей от 0.05 до 0.40 kg/m³. Эксперименты проводились при числе Маха падающей ударной волны 3.6 и двух плотностях потока 0.11 и 0.19 kg/m³ (единичные числа Рейнольдса потока $2.0 \cdot 10^6$ и $3.5 \cdot 10^6$ m⁻¹). При этом длина однородного спутного течения за фронтом ударной волны (замыкающегося контактной поверхностью) составляет около 30 см. В ударной трубе толщина пограничного слоя возрастает от нуля на фронте ударной волны по направлению к контактной поверхности, и на определенном расстоянии от фронта ударной волны пограничный слой становится турбулентным [4]. Толщина ламинарного пограничного слоя в условиях эксперимента не превышала 0.2 mm.

Две противоположные стенки канала разрядной камеры представляют собой плоскопараллельные кварцевые стекла протяженностью 17 см. Две другие стенки разрядной камеры образуют плоскую систему электродов разряда, полученную травлением слоя меди (100 μm) на поверхности стеклотекстолита. Импульсные скользящие поверхностные распределенные разряды размером 30 × 100 mm инициировались на этих стенках на расстоянии 24 mm друг от друга.

Импульсный скользящий поверхностный разряд (плазменный лист) в неподвижном воздухе представляет собой систему параллельных диффузных и отдельных более ярких каналов, скользящих по поверхности диэлектрика (рис. 1, a). Разряд инициировался при подаче

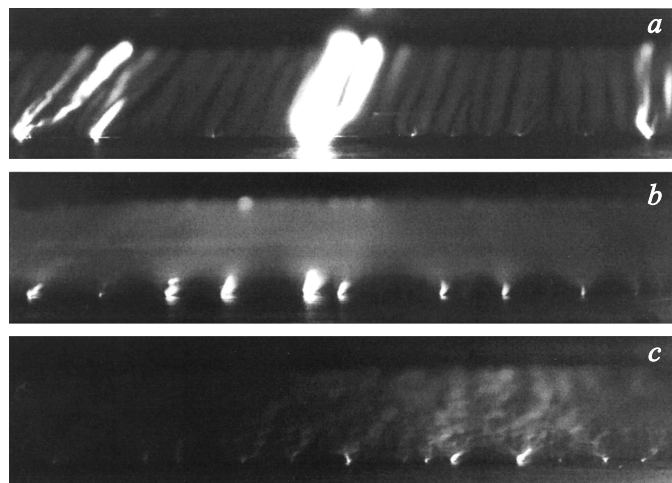


Рис. 1. Свечение поверхностного разряда (плотность 0.11 kg/m^3): *a* — в неподвижном воздухе; *b* — в ламинарном пограничном слое; *c* — в турбулентном пограничном слое. Поток направлен слева направо.

импульсного напряжения 25 kV . Длительность тока разряда составляла $\sim 200 \text{ ns}$. Спектроскопические исследования показали, что основной вклад в излучение видимого и ультрафиолетового диапазонов дает вторая положительная система азота. Длительность свечения диффузного слоя разряда в этом оптическом диапазоне, определенная при помощи стробируемой цифровой наносекундной камеры, не превышает 300 ns .

Исследовался ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое на стенках канала в разрядной секции в сверхзвуковом потоке за ударной волной. В качестве визуализирующего средства использовалась подсветка структуры потока при помощи наносекундного распределенного поверхностного разряда. Длина области разряда в направлении потока (10 cm) меньше длины спутного потока (30 cm), приповерхностное течение зондировалось на различных участках потока. Интегральное свечение разряда регистрировалось цифровым фотоаппаратом Nikon D50. Оптическая ось фотоаппарата располагалась под небольшим углом к плоскости плазменного листа, перпендикулярно направлению движения потока.

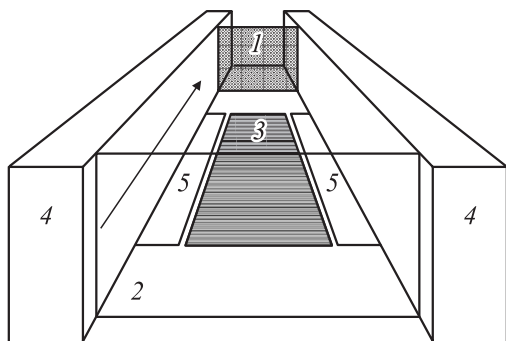


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 — ударная волна, 2 — контактная поверхность, 3 — область поверхностного разряда, 4 — стекла, 5 — электроды. Стрелкой показано направление потока.

Энерговклад, производимый разрядом, значительно влияет на структуру потока. Однако, как было показано, время высвечивания разряда составляет около 300 ns. Это во много раз меньше характерных времен протекания газодинамических процессов в ударной трубе. Таким образом, можно утверждать, что за время регистрации интегрального свечения разряда поток смещается не более чем на 0.3 mm, и структура приповерхностного слоя течения не изменяется. Как было показано в [8], толщина плазменного слоя разряда в потоке составляет около 0.4 mm при указанных скоростях и плотностях потока, и эта величина соизмерима с толщиной пограничного слоя. В свою очередь, особенности течения около поверхности влияют на характер и геометрию развития разряда. Из чего следует, что поверхностный разряд наносекундной длительности является хорошим инструментом для визуализации структуры приповерхностного течения.

Схема проведения эксперимента показана на рис. 2. Инициирование поверхностного разряда производилось через заданное время в потоке за ударной волной после того, как она выходила за пределы разрядной области.

Полученные изображения свечения плазмы разряда позволили исследовать структуру приповерхностного течения на двух противоположных стенках по всей длине спутного потока между фронтом ударной волны и контактной поверхностью. Анализ экспериментальных изобра-

жений показал, что непосредственно за фронтом ударной волны свечение разряда диффузно-однородное и гладкое (рис. 1, *b*), без видимых разрывов свечения. На некотором расстоянии от фронта ударной волны характер свечения разряда менялся. Свечение становилось неоднородным, возникали хаотические структуры, отдельные криволинейные каналы (рис. 1, *c*). Анализ изображений в потоке убедительно свидетельствует, что характер свечения разряда меняется в связи с изменением структуры пограничного слоя — от ламинарного пограничного слоя за фронтом ударной волны до турбулентного течения ближе к контактной поверхности. Непосредственно около фронта контактной поверхности наблюдалось усиление интенсивности свечения разряда.

Обработка изображений показала, что при плотности 0.11 kg/m^3 переход от ламинарного режима течения в пограничном слое к турбулентному происходит на расстоянии $10\text{--}12 \text{ cm}$ от фронта ударной волны, а при плотности 0.19 kg/m^3 — на расстоянии $6\text{--}8 \text{ cm}$ от фронта ударной волны. Таким образом, положение зоны ламинарно-турбулентного перехода зависело от плотности набегающего потока при постоянных других параметрах.

Положение перехода от ламинарного пограничного слоя к турбулентному в сверхзвуковом потоке за ударной волной можно характеризовать критическим числом Рейнольдса, определяемым как

$$\text{Re}_k = U_\infty \rho_\infty x_t / \mu_\infty,$$

где U_∞ , ρ_∞ , μ_∞ — скорость, плотность и вязкость потока соответственно, а x_t — расстояние от фронта ударной волны, на котором осуществляется переход [4].

В проведенных экспериментах критическое число Рейнольдса перехода при указанных плотностях потока оказалось равным $\sim 2.4 \cdot 10^5$. Это значение хорошо согласуется с результатами [4]. Таким образом, предложенный метод визуализации пограничного слоя свечением поверхностного скользящего разряда наносекундной длительности позволяет достаточно точно определять положение ламинарно-турбулентного перехода. Возможность организации данного типа разряда на искривленной поверхности позволяет применять его для визуализации некоторых трехмерных приповерхностных течений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 09 „Исследование вещества в экстремальных условиях“ (раздел 2) и гранта РФФИ 06-08-01301-а.

Список литературы

- [1] Шиплюк А.Н., Буров Е.В., Маслов А.А., Фомин В.М. // ПМТФ. 2004. Т. 45. № 2. С. 169–176.
- [2] Курячий А.П. // Изв. РАН. МЖГ. 2006. № 3. С. 50–59.
- [3] Сидняев Н.И. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 13. С. 19–25.
- [4] Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977. 274 с.
- [5] Бобашев С.В., Васильева Р.В., Ерофеев А.В., Лапушкина Т.А., Поняев С.А., Ван Ви Д.М. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 3. С. 25–32.
- [6] Nishihara M., Jiang N., Rich J.W., Lempert W.R., Adamovich I.V., Gogineni S. // Phys. Fluids. 2005. V. 17. 106102. P. 1–12.
- [7] Znamenskaya I.A., Mursenkova I.V., Kuli-Zade T.A., Kolycheva A.N. // 26th International Symposium on Shock Waves (ISSW-26). Goettingen, 2007. Book of Abstracts. P. 77.
- [8] Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Луцкий А.Е., Мурсенкова И.В., Сысолев Н.Н. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 5. С. 10–18.