

УДК 532.526.3

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА СТЕКЛЯННОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАНАЛА ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

© 2020 г. И. А. Дорощенко^а, И. А. Знаменская^а, Т. А. Кули-заде^а, Д. И. Татаренкова^{а,*}

^а МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

*E-mail: tatarenkova.darya@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.03.2020 г.

После доработки 12.03.2020 г.

Принята к публикации 12.03.2020 г.

Изучается влияние ламинарного и турбулентного пограничного слоя на локализацию свечения импульсного разряда в газодинамическом канале в покоящейся газе и в потоке. Обнаружено, что свечение разряда, локализованного в область отрыва на поверхности стекла, имеет вид правильных структур, отражающих структуру турбулентных неоднородностей в пограничном слое. Для визуализации был использован объемный импульсный разряд с ультрафиолетовой предыонизацией, который реализуется в рабочей камере прямоугольного сечения.

Ключевые слова: импульсный объемный разряд, пограничный слой, ламинарно-турбулентный переход, сверхзвуковой поток, высокоскоростная съемка

DOI: 10.31857/S0568528120050047

В последние десятилетия активно исследуется возможность управляемого воздействия газовых разрядов на потоки газа. Разнообразные исследования показали, что для эффективного воздействия на высокоскоростной поток газа необходим импульсный или импульсно-периодический источник энергии. В качестве такого типа источника наилучшим образом подходят импульсные разряды: оптический разряд, сильноточные наносекундные разряды. Длительность нагрева газа, реализуемая таким разрядом, намного меньше характерных времен газодинамического потока. За время пробоя плазменные неустойчивости не успевают развиваться. Воздействие разряда на поток главным образом определяется энерговкладом, его однородностью [1], конфигурацией разрядной области, а также параметрами исходного течения.

Одной из важнейших задач современной аэродинамики является контроль ламинарно-турбулентного перехода в пограничных слоях [2, 3]. Данный процесс описывается, как правило, теорией гидродинамической устойчивости [4, 5]. Можно выделить два основных механизма перехода к турбулентности в пограничном слое: при малой и повышенной степени турбулентности набегающего потока. При малой степени турбулентности процесс перехода можно разделить на следующие стадии: 1 — возмущение малых амплитуд (волны Толлмина—Шлихтинга); 2 — стадия трехмерного развития волн неустойчивости конечных амплитуд (Λ -структур); 3 — область образования, развития и взаимодействия турбулентных пятен. При повышенной степени турбулентности набегающего потока механизм перехода будет следующим: 1 — стадия развития полосчатых структур; 2 — область нелинейного развития и зарождения турбулентных пятен; 3 — область развития и взаимодействия турбулентных пятен [4].

Положение области ламинарно-турбулентного перехода обычно определяется в сверхзвуковых потоках путем регистрации сигналов от тепловых датчиков или датчиков давления на обтекаемой поверхности [6]. Визуализация пограничного слоя тeneвым методом применима в основном к двумерным течениям [7].

Одним из эффективных методов визуализации структуры нестационарных трехмерных течений является регистрация интегрального свечения разряда наносекундной длительности [8, 9].

При использовании метода “лазерного ножа” визуализируются структуры в пограничном слое значительной толщины. В аэродинамической трубе был применен метод визуализации поверхностного течения, основанный на использовании эффекта люминесценции вещества после ультрафиолетового облучения [10].

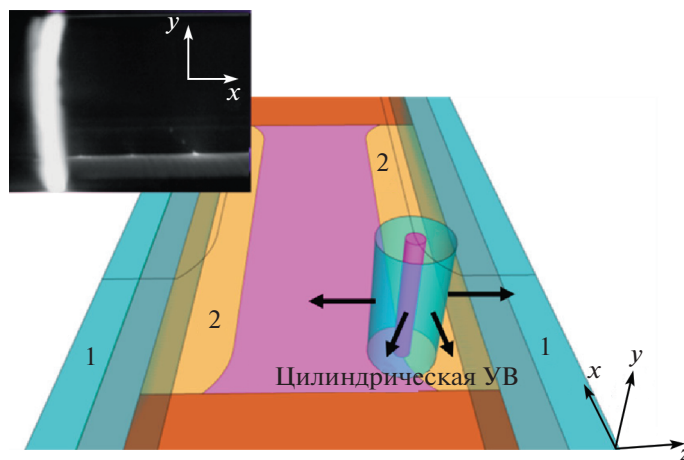


Рис. 1. Импульсное плазменное образование в покое газе. Вверху — интегральный кадр свечения разряда при давлении $p = 140$ Торр. Внизу — схема разрядной секции, разряда и создаваемой им цилиндрически-симметричной ударной волны: 1 — кварцевые стекла, 2 — плоские электроды.

В представленной работе панорамными методами изучается влияние пограничного слоя, развивающегося на стеклянной стенке канала ударной трубы на локализацию импульсного объемного разряда в газодинамическом канале. Рассмотрен характер пробоя объемного разряда вдоль окна рабочей камеры высотой 24 мм при переходе от ламинарного к развитому турбулентному потоку.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕМНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА

Эксперименты проводились в разрядной камере стенда УТРО-3. Сечение ударной трубы и разрядной камеры одинаково и составляет 48 мм (ширина) $\times$ 24 мм (высота). 100 мм — длина разрядного промежутка. Длительность электрического тока разряда не превышает 300 нс, а длительность послесвечения релаксирующей среды в области пробоя не превышает 5 мкс [11]. Энергия разряда, переходящая во внутреннюю энергию газа и приводящая к его нагреву на временах до 1 мкс, составила 120–160 мДж. В качестве рабочего газа использовался воздух и толкающего гелия. Верхняя и нижняя стенки разрядной камеры выполнены из диэлектрических подложек толщиной около 1 мм. Плазменные листы (электроды) размером 30×100 мм предыонизировали поток газа в камере прямоугольного сечения, способствуя образованию объемного разряда между ними. Оборудование синхронизации обеспечивает запуск разряда в потоке в любой момент нестационарного газодинамического процесса в потоке за фронтом ударной волны с числами Маха $M = 2.5\text{--}3.5$. Боковые стенки канала выполнены из кварцевого стекла для оптического доступа к разрядной камере. Длительность тока разряда значительно меньше характерных газодинамических времен для данной экспериментальной установки, таким образом разряд визуализирует мгновенные неоднородности свечения разряда в поле течения газа. Пробой инициировался посредством разрядки конденсатора, заряженного до напряжения 25 кВ, полная электрическая энергия которого составляла 710 мДж. В диапазоне давлений 20–100 Торр в разрядной секции свечение разряда однородно по объему. При давлении от 100 до 250 Торр локализация объемного разряда происходила между верхним и нижним электродами на расстоянии 9 мм от ближайшего стекла; разряд контрагируется в плазменный канал цилиндрической формы (высотой 24 мм и диаметром 1.5–2 мм) [11]. Рассматриваемая разрядная конфигурация обеспечивает быстрый нагрев газа за короткие времена порядка 1 мкс. В результате формируется ударно-волновое течение, которое регистрировалось с помощью высокоскоростной теневой съемки [11]. Интегральные кадры свечения разряда регистрировались цифровым фотоаппаратом в оптическом диапазоне.

Схема разрядной конфигурации и пример одного из полученных изображений контрагированного цилиндрического канала приведены на рис. 1. Канал пробоя имеет правильную цилиндрически-симметричную форму и расположен между кромками электродов, ввиду отсутствия течения, пограничных слоев и значительных флуктуаций плотности в разрядном промежутке.

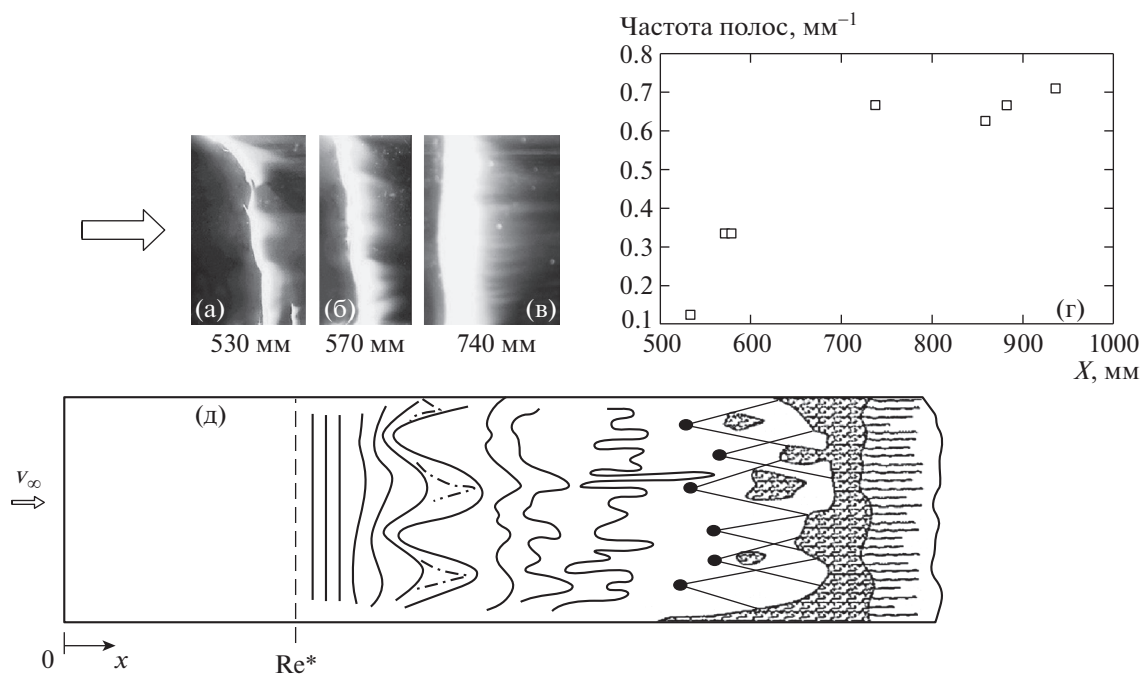


Рис. 2. Сравнение визуализации импульсным разрядом (а–в) с классической схемой Шлихтинга (д) [4]; (г) – зависимость частоты полос от расстояния до ушедшего фронта УВ.

Динамика течения, создаваемого цилиндрическим разрядом в неподвижном воздухе, регистрировалась с помощью высокоскоростной теневой съемки. Зафиксированы цилиндрические ударные волны с центром симметрии вдоль оси канала пробоя.

ОБЪЕМНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ РАЗРЯД В ПОТОКЕ ПРИ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОМ ПЕРЕХОДЕ

В экспериментах по поджигу разряда в потоке за фронтом плоской ударной волны запуск регистрирующего оборудования осуществлялся с заданной задержкой по сигналу с датчиков давления, расположенных вдоль ударной трубы. При инициировании объемного разряда за фронтом ударной волны на стадии, когда поток ламинарный, свечение разряда является однородным по объему.

Инициирование разряда в потоке в ударной трубе помогает определить область ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое и исследовать динамику развития турбулентности. Обнаружено, что свечение разряда, локализованного в область турбулентного пограничного слоя, развивающегося на поверхности стекла, имеет вид регулярных, вытянутых по потоку структур, отражающих конфигурации полосчатых структур в пограничном слое.

При локализации разряда в ламинарном пограничном слое объемный разряд локализуется в виде правильного однородного канала, развивающегося вдоль поверхности стекла. При усилении возмущений малых амплитуд после вертикального пробоя, реализующегося за десятки наносекунд, плазма разряда сносится по потоку неоднородно (языками) в соответствии с неоднородностью поля скоростей и плотности в продольных структурах в пограничном слое.

После ламинарно-турбулентного перехода (в потоке за ударной волной на стекле в зоне неоднородного приповерхностного течения) пробой вдоль стекла происходит в виде вертикального плазменного образования с ровным краем с наветренной стороны и крупномасштабными неоднородностями (3–4 выступа вниз по течению, см. рис. 2, поток слева направо). Послесвечение плазмы разряда около 1–2 мкс. Таким образом, на изображении мы можем видеть зоны неоднородности в пограничном слое газа – полосчатые структуры, характерные для турбулентного пограничного слоя уже на начальной стадии турбулизации [12].

По мере развития пограничного слоя за ударной волной интенсивность возмущений (амплитуда плазменных “языков”) уменьшается, но увеличивается частота этих возмущений (рис. 2б, 2в).

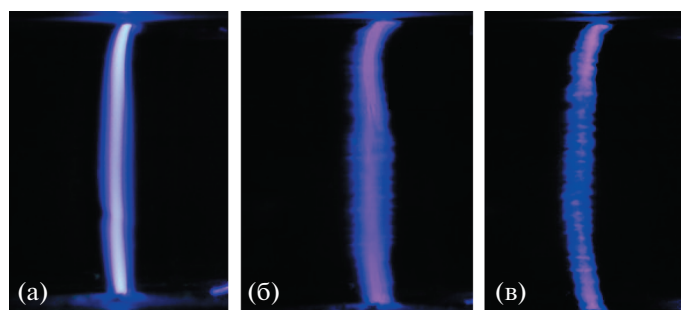


Рис. 3. Кадры свечения плазмы импульсного объемного разряда при контракции в неподвижном воздухе: при локализации в область отрыва на поверхности стекла — (а), при пересечении ударной волны с ламинарным пограничным слоем — (б); при локализации в область отрыва при пересечении ударной волны с турбулентным пограничным слоем — (в).

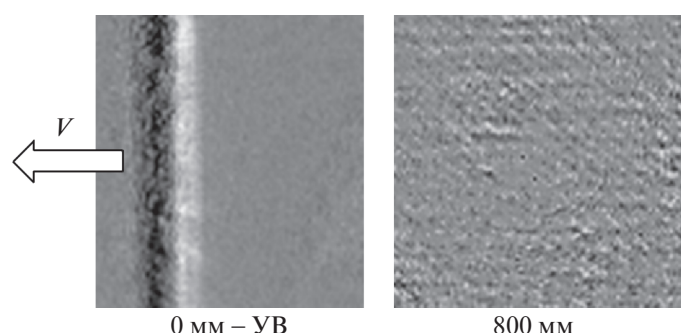


Рис. 4. Визуализация ламинарного пограничного слоя (левый кадр) и ламинарно-турбулентного перехода (правый снимок). Высокоскоростная съемка.

На рис. 2г представлена зависимость частоты полосчатых структур от расстояния до ушедшей ударной волны. Визуализируется импульсным разрядом результат “каскадного переноса” энергии все более и более мелким вихрям. Сравнение трех картин визуализации разрядом для потока за ударной волной (с числом Маха $M = 2.9 \pm 0.1$ и при начальном давлении 2700 Па) с классической схемой Шлихтинга (рис. 2) показывает хорошее сходство.

Обнаружено, что импульсный объемный разряд локализуется в зону пересечения плоской ударной волны в пограничном слое (рис. 3б, 3в). Разряд также визуализирует полосчатые структуры в зоне отрыва, возникающей при пересечении скачка уплотнения с турбулентным пограничным слоем на стекле.

Теневая высокоскоростная съемка позволила определить области ламинарно-турбулентного перехода на стекле на расстоянии 600–800 мм от ударной волны (экспозиция каждого кадра составляла 1 мкс) [8] (рис. 4). Полосчатые структуры пропадали при полной турбулизации объема в канале. Тогда же пробой разряда происходит уже через объемную часть потока.

В результате локализации наносекундного разряда формируются локальные области повышенной температуры, ударные волны, что оказывает влияние на течение в пограничном слое в целом [11]. Были зарегистрированы и возмущения, вызванные локализацией короткоживущей плазмой в пограничном слое; они оказывают влияние на приповерхностное течение, что представляет интерес с практической точки зрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено влияние ламинарного и турбулентного пограничного слоя на локализацию свечения импульсного объемного разряда в газодинамическом канале в потоке. Полученные результаты сравнивались с исследованиями локализации разряда в неподвижном воздухе и в зоне пересечения скачка уплотнения с пограничным слоем на стекле. Было отмечено, что свечение объемного импульсного разряда, локализованного в область отрыва на поверхности стекла, имеет вид

структур, отражающих структуры в турбулентном течении в пограничном слое. Получена зависимость частоты полос от длины пограничного слоя.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 18-19-00672).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасенко В., Бакиш Е., Ломаев М., Рыбка Д., Сорокин Д. Переход от диффузного к искровому разряду при наносекундном пробое азота и воздуха повышенного давления в неоднородном электрическом поле // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 8. С. 29–35.
2. Choi K.-S., Jukes T., Whalley R. Turbulent boundary-layer control with plasma actuators // Philosophical Transactions of the Royal Society. 2011. V. 369. № 1940. P. 1443–1458.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0362>
3. Ванг Х.Л., Никитин Н.В., Чернышенко С.И. Идентификация ламинарно-турбулентной границы в частично турбулентном течении // Изв. АН СССР. МЖГ. 2011. Т. 6. С. 69–75.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1956, 528 с.
5. Липатов И.И., Тугазаков Р.Я. Нелинейная неустойчивость в области перехода от ламинарного к турбулентному движению газа при сверхзвуковом пространственном обтекании пластины / Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2018. Т. 2. С. 1–7.
6. Шиплюк А.Н., Буров Е.В., Маслов А.А., Фомин В.М. Влияние пористых покрытий на устойчивость гиперзвуковых пограничных слоев // ПМТФ. 2004. Т. 45. № 2. С. 169–176.
7. Бобашев С.В., Васильева Р.В., Ерофеев А.В., Лапушкина Т.А., Поняев С.А., Ван Ви Д.М. Особенности релаксации ударно-волновой конфигурации в диффузоре после прекращения воздействия магнитного и электрического полей // Письма ЖТФ. 2006. Т. 32. № 3. С. 25–32.
8. Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Y., Timokhin M.Y., Mursenkova I.V., Glazyrin F.N., Tatarenkova D.I. Experimental investigation of the flow dynamics and boundary layer in a shock tube with discharge section based on digital panoramic methods // 2018. AIP Conference Proceedings. V. 2027. P. 030161.
<https://doi.org/10.1063/1.5065255>
9. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В. Ламинарно-турбулентный переход в сверхзвуковом пограничном слое при инициировании импульсного поверхностного разряда // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 15. С. 75–80.
10. Боровой В.Я., Мошаров В.Е., Ноев А.Ю., Радченко В.Н. Ламинарно-турбулентное течение вблизи клина, установленного на острой и затупленных пластинах // Изв. РАН. МЖГ. 2009. Т. 3. С. 58–74.
11. Znamenskaya I., Koroteeva E., Doroshchenko I., Sysoev N. Evolution and fluid dynamic effects of pulsed column-shaped plasma // Experimental Thermal and Fluid Science. 2019. V. 109. P. 109868.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.109868>
12. Катасонов М.М., Козлов В.В. Влияние поперечных колебаний поверхности на развитие продольных полосчатых структур и зарождающихся турбулентных пятен // Изв. РАН. МЖГ. 1999. Т. 34. № 5. С. 63–72.