

А. А. Яцких^{1,2}, А. Н. Семенов¹, Ю. Г. Ермолаев¹, А. Д. Косинов^{1,2}, Н. В. Семенов¹

¹ *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

² *Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

yermol@itam.nsc.ru

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА НА ВОЗМУЩЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ*

Представлены результаты экспериментального исследования влияния параметров импульсного разряда на возбуждаемые им локализованные пульсации в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины. Эксперименты выполнены в сверхзвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха $M = 2$. Экспериментально установлено, что длительность разряда влияет на пространственные масштабы и амплитуду генерируемых возмущений. Исследована эволюция вниз по потоку локализованных возмущений различной амплитуды. Оценена скорость распространения контролируемых пульсаций в пограничном слое. Обнаружены линейный и нелинейный режимы развития локализованных возмущений.

Ключевые слова: сверхзвуковой поток, импульсный разряд, контролируемый эксперимент, пограничный слой, термоанемометрия.

Введение

Одним из наиболее эффективных подходов в экспериментальных исследованиях ламинарно-турбулентного перехода является эксперимент в контролируемых условиях, когда в поток вводятся возмущения с заданными начальными параметрами, что позволяет определять волновые характеристики и напрямую сопоставлять экспериментальные данные с расчетами. За последние 30 лет удалось достичь значительного прогресса в понимании физических механизмов ламинарно-турбулентного перехода в сверхзвуковых пограничных слоях благодаря использованию электрического разряда для генерации контролируемых волн неустойчивости. Высокочастотный разряд возбуждает в пограничном слое контролируемые

возмущения с дискретным частотным составом (волновые поезда), что позволяет подробно исследовать линейную и слабонелинейную стадии ламинарно-турбулентного перехода. В работах [1–4] получено экспериментальное подтверждение основных положений линейной теории устойчивости для случая двумерного и трехмерного сверхзвуковых пограничных слоев. В [5–6] исследовано слабонелинейное развитие контролируемых возмущений, показано существование параметрического резонанса.

На поздних стадиях турбулизации пограничного слоя, скорее всего, происходит взаимодействие пульсаций в широком спектре. Поэтому перспективным является изучение развития локализованных по пространству и времени контролируемых возмущений (волновых пакетов). Такие возмущения обладают

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-31-00388) и Российского научного фонда (грант № 17-19-01289).

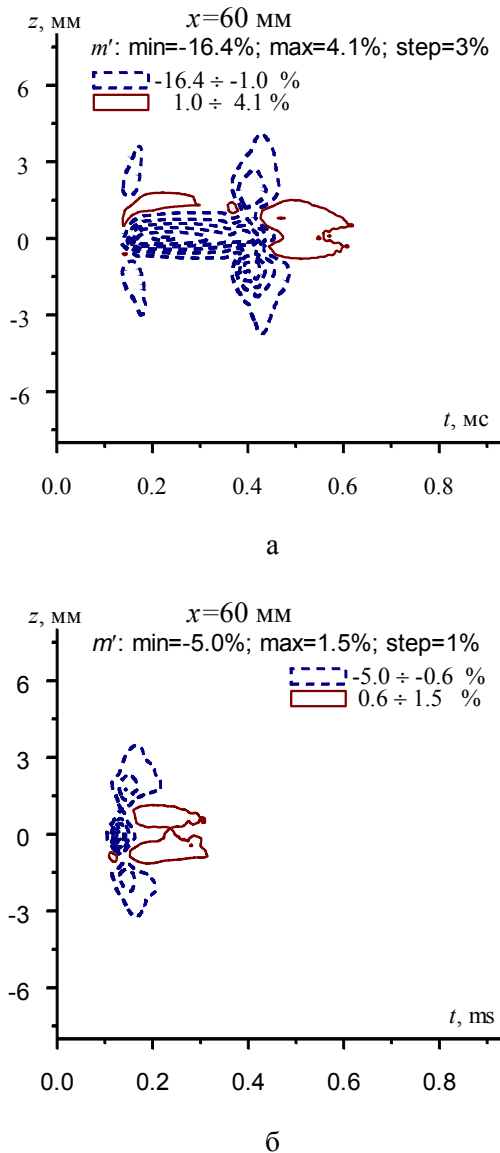


Рис. 1. Изолинии пульсаций массового расхода от импульсного разряда в плоскости (z, t) [18]. Длительность разряда: *a* – 100 мкс; *б* – 25 мкс

широкополосным частотным и пространственным спектральным составом. Контролируемые волновые пакеты могут быть получены с помощью импульсного воздействия на пограничный слой. Первые экспериментальные исследования развития волновых пакетов в пограничном слое были проведены для случая малых скоростей набегающего потока в работе [7]. Последующее развитие подхода локализованных контролируемых возмущений привело к значительному прогрессу в понимании процессов на ранних и поздних стадиях ламинарно-турбулентного перехода дозвуковых пограничных слоев [8–13].

В последние несколько лет метод контролируемых волновых пакетов развивается применительно к высокоскоростным течениям. Так, в работе [14] исследовалась эволюция локализованных возмущений в гиперзвуковом пограничном слое. Контролируемые волновые пакеты генерировались с помощью импульсного электрического разряда. Удалось исследовать линейную и нелинейную стадии эволюции волновых пакетов и их последующее разрушение в турбулентные пятна. Работы [15–19] посвящены изучению эволюции волновых пакетов в пограничных слоях при сверхзвуковых скоростях пограничного слоя. В [16] в пограничный слой пластины вводились одиночные волновые пакеты, пространственный масштаб которых соизмерим с размерами экспериментальной модели, что было связано с длительным горением тлеющего разряда. В работе [17] с помощью импульсного разряда длительностью приблизительно 25 мкс в пограничный слой вводились волновые пакеты со значительно меньшими пространственно-временными масштабами. В [18–19] проведены сравнения возбуждаемых разрядом с различными характеристиками волновых пакетов. Показано образование схожих волновых структур на заднем фронте локализованных возмущений с различными амплитудами и длительностями. На рис. 1 показаны локализованные возмущения, сгенерированные с помощью импульсного разряда. На рис. 1, *a* представлено возмущение от разряда длительностью приблизительно 100 мкс, на рис. 1, *б* – результаты для длительности разряда примерно 25 мкс и значительно меньшей энергии.

На заднем фронте возмущения от разряда формируется структура, состоящая из превышений массового расхода с максимальными отклонениями при $z \approx \pm 0,7$ мм и дефектами с максимумами при $z \approx \pm 1,5$ мм. Длительность и энергия импульсного разряда практически не влияют на форму структур, образующихся на заднем фронте локализованного возмущения от разряда. В центральной области локализованных возмущений выделяется область дефекта течения. При изменении длительности и энергии разряда временные масштабы и амплитуда этого дефекта изменяются. Предположительно, импульсный разряд формирует возмущение в виде дефекта течения, наблюдаемое в центральной области ($z = 0$ мм),

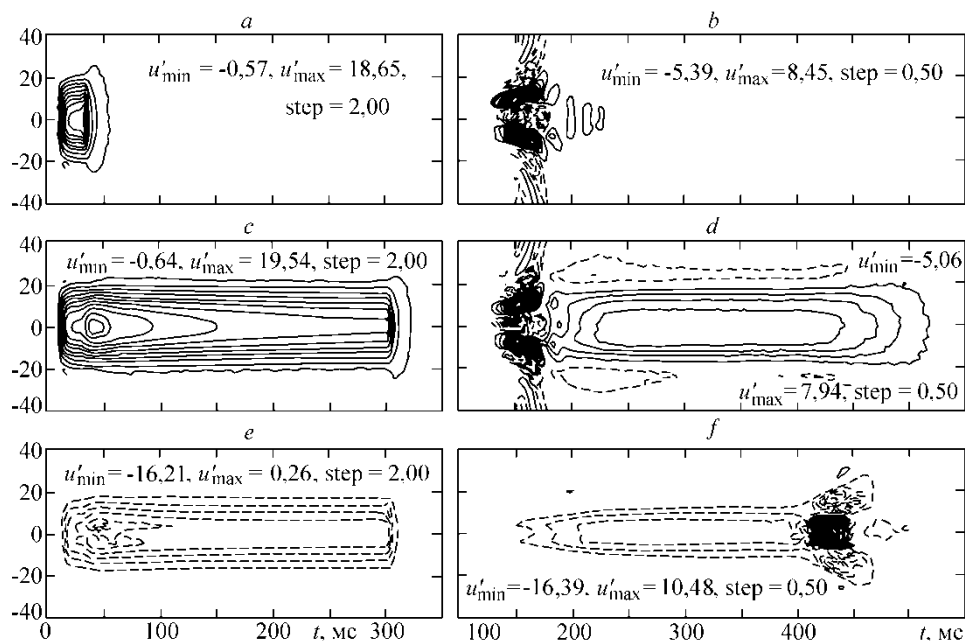


Рис. 2. Изолинии пульсации скорости u' в плоскости $z-t$, большие амплитуды [12]

Источник возмущений – поперечная щель размером $38 \times 0,7$ мм, расположенная при $x = 95$ мм; $a-d$ – возмущения генерированы отсосом; e, f – вдувом; a, c, e – при $x = 100$ мм; b, d, f – при $x = 500$ мм; a, b – «короткое» возмущение длительностью 30 мс; $c-f$ – «длинное» возмущение длительностью 300 мс

а при развитии вниз по потоку на фронтах возмущения от разряда происходит формирование описанных выше структур превышения и дефектов течения.

В экспериментальных исследованиях при малых дозвуковых скоростях набегающего потока ранее были получены схожие результаты. На рис. 2 представлены результаты исследований возбуждения и эволюции локализованных контролируемых возмущений в пограничном слое пластины при малой дозвуковой скорости. Эксперименты и результаты описаны в работе [12]. Контролируемые возмущения генерировались с помощью импульсного локализованного отсоса (рис. 1, $a-d$) и вдува (рис. 1, e, f). В ближней к источнику области временные масштабы возмущения близки к длительности воздействия на пограничный слой, а поперечный размер близок к размеру источника. При развитии вниз по потоку на фронтах локализованных возмущений образуется так называемая «пафф-структура». При этом вид «пафф-структуры» не зависит от длительности воздействия на пограничный слой.

Исследования показали, что формирование волновых структур на фронтах локализованных возмущений зависит от парамет-

ров воздействия на пограничный слой. Изменяя параметры импульсного вдува или отсоса воздуха, удалось управлять крутизной фронтов искусственных возмущений. Это позволило изучить влияние продольного градиента скорости на фронтах локализованных возмущений на возникновение волновых пакетов – предвестников [12–13].

В экспериментальных исследованиях при сверхзвуковых скоростях потока наиболее отработанным и применяемым методом возбуждения контролируемых возмущений является электрический разряд. Несмотря на большое количество работ с использованием электрического разряда в качестве источника контролируемых возмущений, сегодня нет систематизированных данных о влиянии параметров разряда на возбуждаемые им пульсации в сверхзвуковом пограничном слое. Данная работа посвящена изучению влияния параметров импульсного разряда на возбуждаемые в сверхзвуковом пограничном слое локализованные возмущения. Исследуется влияние длительности разряда на амплитуду и временные масштабы дефекта течения в центральной области локализованного возмущения от разряда.

Постановка экспериментов

Эксперименты выполнялись в сверхзвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-325 Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН при числе Маха $M = 2$ и единичном числе Рейнольдса $Re_1 = 3,9 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. В качестве экспериментальной модели использовалась плоская стальная пластина с острой передней кромкой (рис. 3), установленная под нулевым углом атаки. Размеры плоской пластины: ширина – 200 мм, длина – 440 мм, толщина – 10 мм. Угол скоса от передней кромки составлял $14,5^\circ$. Толщина передней кромки не превышала 0,1 мм.

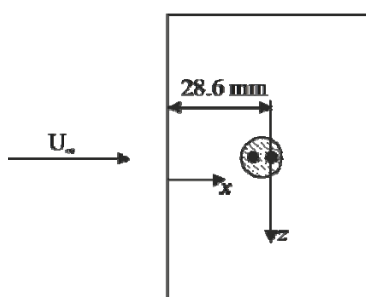


Рис. 3. Модель плоской пластины с источником контролируемых возмущений

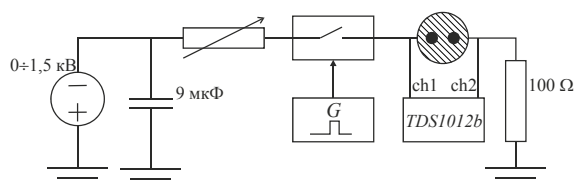


Рис. 4. Схема зажигания импульсного разряда

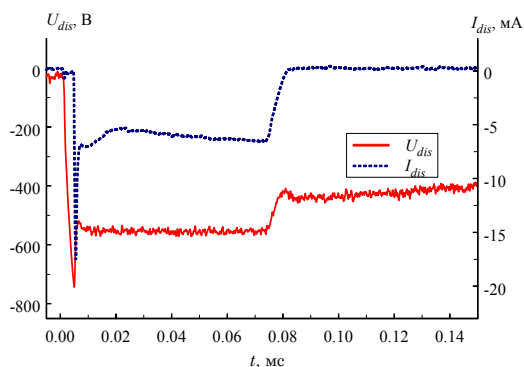


Рис. 5. Зависимость тока разряда и падения напряжения на разряднике от времени

Для возбуждения контролируемых волновых пакетов зажигался тлеющий разряд между двумя медными электродами, отделенными друг от друга и от модели изолятором. Электроды и изолятор выведены на поверхность модели и отшлифованы заподлицо. Центры электродов располагались параллельно направлению набегающего потока (по координате x). Диаметр электродов – 0,9 мм, а минимальное расстояние между ними – приблизительно 0,9 мм.

К электродам подводились импульсы высокого напряжения. Схема зажигания импульсного тлеющего разряда представлена на рис. 4. Работа схемы основана на модуляции высокого напряжения с помощью быстродействующего высоковольтного ключа. Схема зажигания позволяет генерировать импульсы высокого напряжения амплитудой до 1,5 кВ, длительностью от 5 до 600 мкс. Управление высоковольтным ключом было синхронизировано с измерительным комплексом АДТ-325.

Для контроля зажигания разряда с помощью двухканального осциллографа Tektronix TDS 1012b производились измерения падения напряжения на межэлектродном промежутке и силы тока разряда. Подводимое к электроду напряжение измерялось каналом 1 с помощью высоковольтного делителя напряжения. Ток разряда измерялся вторым каналом осциллографа с помощью малого сопротивления 100 Ω .

На рис. 5 представлен пример временной зависимости напряжения и тока разряда, полученные в процессе экспериментов. Непрерывная красная линия соответствует падению напряжения на межэлектродном промежутке. Синей прерывистой кривой представлено изменение тока, протекающего через разряд. В нулевой момент времени подается сигнал на открытие высоковольтного ключа. В течение примерно 4 мкс наблюдается зарядка паразитной емкости разрядника. При достижении разницы напряжения между электродами приблизительно 750 В происходит пробой межэлектродного промежутка, сопровождаемый скачком тока. После зажигания наблюдается установившееся горение разряда, при котором ток и напряжение слабо изменяются. Через 75 мкс на ключ подается сигнал на закрытие, и разряд гасится, на что указывает снижение тока до нуля.

Из записываемых осциллографом данных можно вычислить мгновенные значения мощности, выделяемой на разряде. На рис. 6 представлена временная зависимость мгновенной мощности, выделяемой на разряде при различной длительности горения разряда. Во время установившегося горения разряда мощность составляет 3–4 Вт. В момент пробоя разряда наблюдается кратковременный скачок, который связан с резким увеличением тока разряда. Амплитуда этого скачка неизвестна, так как было переопределение диапазона АЦП осциллографа.

Для измерения характеристик течения использовался термоанемометр постоянного сопротивления. Датчик термоанемометра изготавливался из вольфрамовой нити диаметром 10 мкм и длиной около 1,2 мм. Величина перегрева нити датчика устанавливалась равной 0,8, а измеренные возмущения на 95 % состояли из пульсаций массового расхода. 12-разрядным АЦП записывался полный сигнал термоанемометра в компьютер. Частота дискретизации АЦП составляла 1,25 МГц. Записанный сигнал разделялся на пульсационную e' и постоянную E составляющие. Постоянная составляющая сигнала E высчитывалась по части осциллограммы, в которой не было возмущений от разряда. Пульсации массового расхода нормировались на локальное среднее течение:

$$m'(t) = \frac{(\rho U)'}{\rho U} \approx \frac{1}{S_{\rho U}} \cdot \frac{e'(t)}{E},$$

где $S_{\rho U}$ – коэффициент чувствительности датчика термоанемометра к пульсациям массового расхода. Для термоанемометра постоянного сопротивления значение $S_{\rho U}$ является постоянным и приближенно равно $0,25 \pm 0,02$ [20].

Для выделения возмущений, порожденных импульсным разрядом, из фоновых естественных флуктуаций пограничного слоя измерения производились синхронно с зажиганием разряда. В каждой точке записывались 320 реализаций сигнала, обработка данных состояла из синхронного осреднения осциллограмм по формуле

$$m(t) = \frac{1}{320} \cdot \sum_{i=1}^{320} m'_i(t),$$

где m'_i – единичная реализация сигнала с термоанемометра.

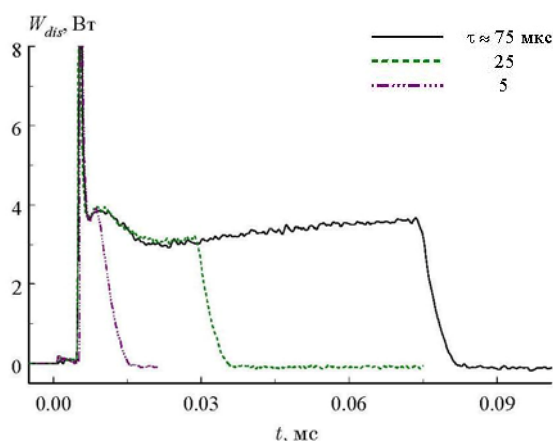


Рис. 6. Временная зависимость мгновенной мощности, подводимой к разряду

Результаты

В данной работе приведены результаты, полученные при различных параметрах импульсного разряда. Измерения производились в центральной области возмущений ($z = 0$ мм, см. рис. 1), возбуждаемых разрядом.

На рис. 7 представлены возмущения пограничного слоя, возбуждаемые импульсным разрядом различной длительности, и временные зависимости мгновенной мощности, выделяемой на разряде. Измерения проведены в пограничном слое на расстоянии 60 мм от передней кромки.

Видно, что временные и пространственные масштабы генерируемых импульсным разрядом локализованных возмущений зависят от длительности разряда. При этом в случае воздействия на пограничный слой длительностью 75 мкс максимальное отклонение от среднего течения составляет приблизительно 5 %, тогда как при разряде в 560 мкс – 12 %. При горении разряда мощность в обоих случаях близка – 3–4 Вт. Можно заключить, что длительность разряда влияет на амплитуду возмущений, порождаемых в пограничном слое. Следует отметить, что время регистрации нарастания возмущений близко к длительности воздействия на пограничный слой.

На рис. 8, а представлены локализованные возмущения от разряда различной длительности, полученные при $x = 60$ мм. На рис. 8, б показаны результаты измерений при $x = 100$ мм, нормированные на модуль

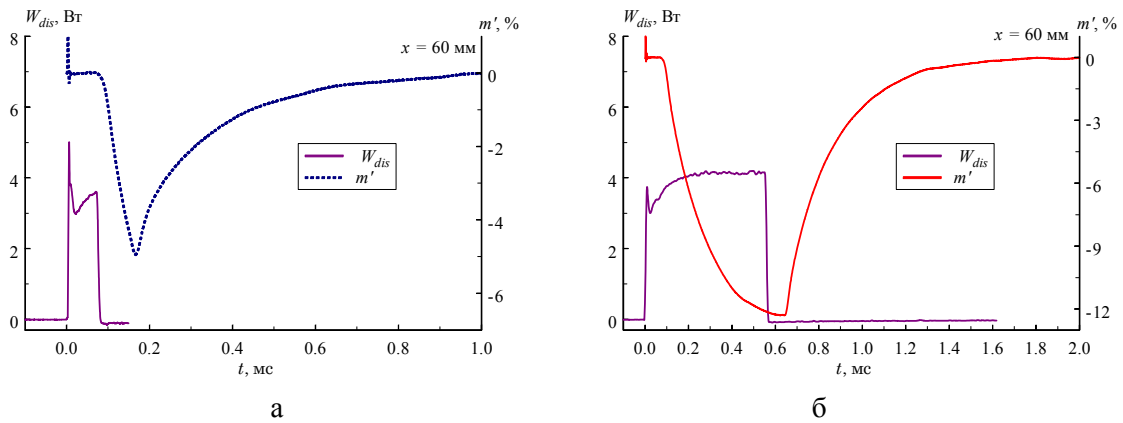


Рис. 7. Осциллограммы волнового пакета и мгновенной мощности разряда при различной длительности: а – 75 мкс; б – 560 мкс

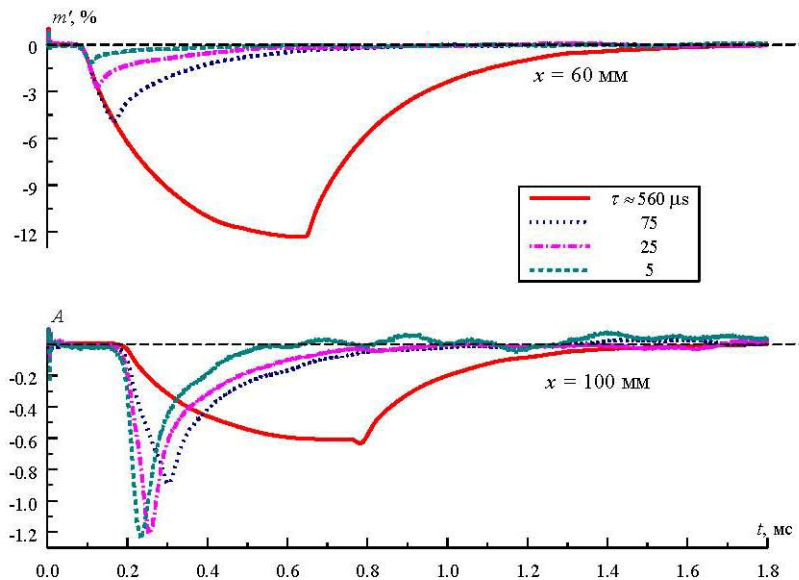


Рис. 8. Осциллограммы локализованных возмущений от разряда различной длительности при разных значениях продольной координаты: а – $x = 60$ мм; б – $x = 100$ мм

максимального значения отклонения массового расхода от среднего течения при $x = 60$ мм по формуле

$$A(t) = \frac{m(t, x=100)}{\max(|m(t, x=60)|)}.$$

При $x = 60$ мм локализованные возмущения обладают схожей формой. Нарастание передних фронтов волновых пакетов от разряда с различной длительностью происходит по одному закону. Задние фронты волновых пакетов также представляются подобными. При $x = 100$ мм момент времени регистрации локализованных возмущений от импульсного разряда увеличивается,

что связано с конечной скоростью распространения вниз по потоку. Оценки по времени регистрации максимального отклонения от среднего течения показывают, что скорость распространения локализованных возмущений составляет приблизительно 60 % от скорости набегающего потока.

Развиваясь вниз по потоку, амплитуда пульсаций от импульсного разряда изменяется. Как видно из рис. 8, б, при длительности разряда 5 и 25 мкс возмущения усиливаются. При этом в обоих случаях наблюдается рост амплитуды пульсаций от разряда приблизительно в 1,2 раза. При больших значениях длительности разряда контроли-

руемые возмущения затухают вниз по потоку. Скорее всего, различие в развитии связано с начальными амплитудами возмущений от импульсного разряда. При кратковременном воздействии на пограничный слой от разряда создаются пульсации амплитудой менее 3 % от среднего течения при $x = 60$ мм. Эти возмущения усиливаются вниз по потоку. Относительный рост волновых пакетов от разряда длительностью 5 и 25 мкс одинаков, что может указывать на линейный характер эволюции локализованных возмущений малой амплитуды.

Локализованные возмущения, порожденные длительным воздействием на пограничный слой, затухают вниз по потоку. При этом степень затухания высокоамплитудных волновых пакетов различна и, скорее всего, зависит от начальной амплитуды.

Заключение

Разработана и апробирована схема возбуждения локализованных возмущений различной длительности и амплитуды в сверхзвуковом пограничном слое. Проведены экспериментальные исследования влияния параметров воздействия на пограничный слой на генерируемые локализованные возмущения. Обнаружено, что длительность импульсного разряда влияет на временные масштабы и амплитуду возбуждаемых волновых пакетов.

Исследована эволюция локализованных возмущений от импульсного разряда различной длительности вниз по потоку. Оценки показывают, что скорость распространения локализованных возмущений от разряда составляет приблизительно 60 % от скорости свободного потока. Обнаружено, что волновые пакеты с амплитудой менее 3 % от среднего течения усиливаются, распространяясь в пограничном слое. Локализованные возмущения с большей амплитудой затухают вниз по потоку.

Список литературы

1. *Kosinov A. D., Maslov A. A., Shevelkov S. G.* Experiments on Stability of Supersonic Boundary Layers // *J. Fluid Mech.* 1990. Vol. 219. P. 621–633.
2. *Колосов Г. Л., Панина А. В., Косинов А. Д., Ермолаев Ю. Г., Семёнов Н. В.* Пространственно-волновая структура кон-

тролируемых возмущений в трехмерном сверхзвуковом пограничном слое // *Вестн. НГУ. Серия: Физика.* 2011. Т. 6, № 4. С. 5–15.

3. *Ермолаев Ю. Г., Колосов Г. Л., Косинов А. Д., Семенов Н. В.* Линейная эволюция контролируемых возмущений в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла // *Изв. РАН. МЖГ.* 2014. Вып. 2. С. 58–68.

4. *Kosinov A. D., Kolosov G. L., Semionov N. V., Yermolaev Yu. G.* Linear development of controlled disturbances in the supersonic boundary layer on a swept wing at Mach 2 // *Phys. Fluids.* 2016. Vol. 28. No. 6. P. 064101.

5. *Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Семенов Н. В.* Характерные особенности слабонелинейного взаимодействия волн неустойчивости в сверхзвуковом пограничном слое // *Вестн. НГУ. Серия: Физика.* 2008. Т. 3, № 3. С. 3–14.

6. *Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Семенов Н. В.* Экспериментальное исследование нелинейного развития волн неустойчивости на плоской пластине при числе Маха $M = 3$ // *Прикладная механика и теоретическая физика.* 1997. Т. 38, вып. 2. С. 107–114.

7. *Gaster M., Grant I.* An experimental investigation of the formation and development of a wave packet in a laminar boundary layer // *Proc. R Soc. Lond., A.* 1975. Vol. 347. P. 253–269.

8. *Катасонов А. А., Козлов В. В., Никитин Н. В., Сбоев Д. С.* Возникновение и развитие локализованных возмущений в круглой трубе и пограничном слое / *Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск,* 2014. 222 с.

9. *Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов В. В., Чернорай В. Г.* Экспериментальное исследование механизма вторичного высокочастотного разрушения λ -структуры // *Теплофизика и аэромеханика.* 1999. Т. 6, вып. 4. С. 445–460.

10. *Довгаль А. В., Катасонов М. М., Козлов В. В., Павленко А. М.* Эволюция возмущений ламинарного течения за уступом поверхности, генерируемых ее локализованными вибрациями // *Изв. РАН. МЖГ.* 2017. Вып. 3. С. 63–70.

11. *Горев В. Н., Катасонов М. М., Щербаков В. А.* Экспериментальное исследование возникновения и развития волновых пакетов – предвестников локализованных возмущений в двумерных и трехмерных пограничных слоях // *Вестн. НГУ. Серия: Физика.* 2007. Т. 2, № 4. С. 49–54.

12. Альфредссон П. Х., Катасонов М. М., Козлов В. В. Генерация и развитие «пасивных» возмущений в пограничном слое Блазиуса // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, вып. 3. С. 363–370.

13. Katasonov M. M., Park S.-H., Sung H. J., Kozlov V. V. Instability of streaky structure in a Blasius boundary layer // Experiments in Fluids. 2005. Vol. 38. No. 3. P. 363–371.

14. Casper K. M., Beresh S. J., Schneider S. P. Pressure fluctuations beneath instability wavepackets and turbulent spots in a hypersonic boundary layer // J. Fluid Mech. 2014. Vol. 756. P. 1058–1091.

15. Яцких А. А., Руменских М. С., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Семенов Н. В., Косорыгин В. С. Возбуждение локализованного волнового пакета в трехмерном сверхзвуковом пограничном слое // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2017. Т. 12, № 1. С. 57–65.

16. Яцких А. А., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Семёнов Н. В. Возбуждение и развитие волновых пакетов в сверхзвуковом

сдвиговом слое // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2013. Т. 8, № 2. С. 70–78.

17. Яцких А. А., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Семенов Н. В. Эволюция волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, вып. 1. С. 17–28.

18. Yatskikh A. A., Ermolaev Y. G., Kosinov A. D., Semionov N. V. Hot-wire visualization of the evolution of localized wave packets in a supersonic flat-plate boundary layer // Journal of Visualization. 2017. Vol. 20. No. 3. P. 549–557.

19. Яцких А. А., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Семенов Н. В. О пространственной структуре волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, вып. 7/2. С. 132–136.

20. Kosinov A. D., Semionov N. V., Yermolaev Yu. G. Disturbances in test section of T-325 supersonic wind tunnel ITAM SB RAS. Новосибирск, 1999. Препринт № 6-99.

Материал поступил в редколлегию 30.06.2017

A. A. Yatskikh^{1,2}, A. N. Semenov¹, Yu. G. Yermolaev¹
A. D. Kosinov^{1,2}, N. V. Semionov¹

¹ Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

² Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

yermol@itam.nsc.ru

INFLUENCE OF PULSED DISCHARGE PARAMETERS ON PULSATIIONS OF FLAT-PLATE SUPERSONIC BOUNDARY LAYER

The results of experimental study of the influence of the parameters of a pulsed discharge on the localized pulsations in the flat-plate supersonic boundary layer are presented. The experiments were performed in a supersonic low-turbulent wind tunnel T-325 of ITAM SB RAS at Mach number $M = 2$. It is experimentally established that the duration of the discharge affects on the spatial scales and the amplitude of the generated perturbations. Studies of the evolution downstream of localized perturbations of different amplitudes were carried out. The propagation velocities of controlled pulsations in the boundary layer were estimated. Linear and nonlinear regimes of evolution of localized perturbations were found.

Keywords: supersonic flow, pulsed discharge, controlled experiment, boundary layer, hot-wire measurements.