

УДК 532.526

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВОЗМУЩЕНИЙ ОТ ДВУХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПЛАСТИНЫ

© 2023 г. Л. В. Афанасьев^а, Ю. Г. Ермолаев^а, А. Д. Косинов^а,
В. Л. Кочарин^а, Н. В. Семенов^а, А. А. Яцких^{а,*}

^аИнститут теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

*E-mail: yatskikh@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 27.01.2023 г.

После доработки 13.03.2023 г.

Принята к публикации 20.03.2023 г.

Описано развитие нового экспериментального метода введения в сверхзвуковой пограничный слой контролируемых возмущений с заданной частотно-волновой структурой. Представлены данные экспериментов по формированию возмущений от двух импульсных источников (импульсный тлеющий разряд) в ламинарном пограничном слое пластины при числе Маха, равном 2. Эксперименты выполнены в аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН. Локализованные источники располагались на одинаковом расстоянии от передней кромки пластины в 6 мм друг от друга по размаху. Пульсации потока измерялись с помощью одноточечного датчика термоанемометра постоянного сопротивления, запись сигнала проводилась синхронно с зажиганием разрядов, что позволяло выделять возмущения от разрядов из фона случайных неконтролируемых “естественных” пульсаций пограничного слоя. Анализируются пространственно-временная структура и частотно-волновой состав генерируемых возмущений от одиночного и двух разрядов, работающих синхронно и с задержкой во времени. Получено, что наибольшие отличия в структуре возмущений от одного и двух источников наблюдаются в центральной области, тогда как на боковых границах возмущения пульсации близки во всех рассматриваемых случаях. В спектрах возмущений по поперечным волновым числам от двух разрядов формируются узлы и пучности, положение которых определяется расстоянием между источниками и временной задержкой в их работе.

Ключевые слова: эксперимент, сверхзвуковой пограничный слой, источник контролируемых возмущений, импульсные тлеющие разряды

DOI: 10.31857/S1024708423600070, **EDN:** WLFQGI

В настоящее время общепринято, что переход ламинарного пограничного слоя в турбулентное состояние представляет собой сложный процесс возникновения (возбуждения) возмущений различного типа, их развития, взаимодействия друг с другом и средним течением, приводящий к турбулентному режиму. Одним из подходов при изучении возникновения турбулентности в пограничных слоях является экспериментальное исследование эволюции контролируемых возмущений. В поток вводятся возмущения с фиксированными начальными параметрами, что позволяет определять волновые характеристики развития возмущений и проводить количественное сравнение с результатами расчетов. В экспериментах при сверхзвуковых скоростях потока наиболее отработанным методом возбуждения контролируемых возмущений является тлеющий разряд, зажигаемый в локальной области экспериментальной модели. В случае периодического зажигания разряда в пограничном слое формируется возмущение, обладающее узким частотным и широким поперечно-волновым спектром (волновые пучки). С помощью такого подхода удается изучать ранние стадии ламинарно-турбулентного перехода в двумерных [1–3] и трехмерных [4, 5] сверхзвуковых пограничных слоях. В случае импульсного воздействия в пограничном слое формируется локализованное в пространстве и времени возмущение (волновой пакет), такой подход позволяет изучать развитие возмущений в широком частотно-волновом спектре. В экспериментах [6–9] для введения локализованных возмущений в сверхзвуковой пограничный слой использовался импульсный тлеющий разряд, зажигаемый на поверхности модели.

Для определения механизмов взаимодействия возмущений на поздних стадиях ламинарно-турбулентного перехода в высокоскоростных пограничных слоях необходимы подробные численно-экспериментальные исследования. В задачах по изучению нелинейной стадии развития важную роль может играть начальная структура возмущений. В исследованиях с помощью численного моделирования исходное возмущение может быть задано с помощью динамических граничных условий, при этом возможно задавать параметры возмущений на входе. В расчетах также используются локализованные в пространстве источники возмущения, которые обладают широким поперечно-волновым спектром. Аналогично экспериментам в них рассматривается как периодическое [10], так и локализованное [11–13] во времени воздействие на пограничный слой. Другой подход состоит в следующем: задаются волны или пакеты волн, параметры которых рассчитываются по линейной теории устойчивости [15, 16], либо вводятся пульсации, характерные для условий полета [17]. Для корректного экспериментального моделирования необходим метод возбуждения в пограничном слое контролируемых возмущений, параметры которых (амплитуда, частотный и поперечно-волновой состав, фазовые соотношения спектральных компонент и т.д.) могли бы варьироваться в широких пределах. Используемые сегодня при высоких скоростях методы, основанные на одиночном локализованном источнике, не дают возможности контролировать все указанные параметры. Возможным способом является возбуждение контролируемых возмущений комплексом из нескольких источников, разнесенных в пространстве и позволяющих сдвигать фазы сигналов источников во времени.

При малых дозвуковых скоростях потока в исследованиях ламинарно-турбулентного перехода пограничного слоя многосоставные источники возмущений успешно используются. Впервые такой подход при дозвуковых скоростях потока применен в работе [18], где показан эффект наложения и вычитания контролируемых возмущений. Дальнейшее развитие такого подхода привело к созданию многокомпонентного источника возмущения, с помощью которого в пограничный слой вводятся возмущения с варьируемыми в широкой области начальными параметрами [19–21].

Для случая высоких скоростей набегающего потока подход многокомпонентных источников контролируемых возмущений развит значительно меньше. В [22] в качестве источника периодических контролируемых возмущений использовались несколько электрических разрядов, работающих синхронно на определенной частоте, расположенных на поверхности конуса равномерно в азимутальном направлении. Предполагалось, что такая система источников будет генерировать контролируемые возмущения с выделенным пиком в волновом спектре. Однако в работе не приведено подробных данных о частотно-волновом составе генерируемых возмущений.

В [23] были проведены расчетно-экспериментальные исследования по развитию контролируемых периодических возмущений с узким частотным спектром, генерируемые в пограничном слое пластины двумя точечными источниками. В случае синхронной работы двух источников в волновых спектрах наблюдалось образование узлов и пучностей, а при наличии сдвига фаз наблюдалось смещение положения узлов и пучностей в волновом спектре. Это соответствует интерференции волн, порожденных разнесенными источниками возмущений. Исследования показали, что с помощью изменения параметров работы источников возможно изменять структуру вводимых в сверхзвуковой пограничный слой контролируемых периодических возмущений.

В работе [24] проведено численное моделирование формирования и развития возмущений от двух синхронных импульсных источников в ламинарном пограничном слое пластины при числе Маха потока $M = 2$. Источники располагались на линии, параллельной передней кромке. Исследования проведены для случая одиночного и двух синхронных импульсных источников при различных расстояниях между ними. Получено, что в рассматриваемых случаях рост возмущений вниз по потоку зависит от расстояния между источниками. Показано, что это связано с появлением в волновых спектрах возмущений узлов и пучностей для всех частот, что может быть описано интерференцией волн от источников. Их положение определяется расстоянием между источниками, что определяет волновой состав возмущений и их развитие в физическом пространстве.

Цель данной работы – развить экспериментальный метод введения в сверхзвуковой пограничный слой контролируемых локализованных возмущений с возможностью изменять их частотно-волновую структуру с помощью двух источников. Представлены данные экспериментальных исследований пространственно-временной и частотно-волновой структуры возмущений от одиночного и двух импульсных разрядов, работающих синхронно и с задержкой во времени, в сверхзвуковом пограничном слое пластины при числе Маха, равном 2.

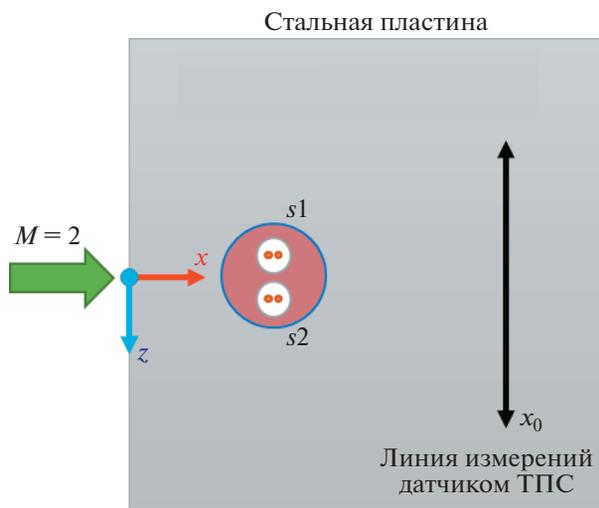


Рис. 1. Схема экспериментов.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН. Параметры потока: число Маха потока $M = 2$, единичное число Рейнольдса $Re_1 = \rho_\infty U_\infty / \mu_\infty = (6 \pm 0.1) \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, где ρ_∞ , U_∞ , μ_∞ — плотность, скорость и вязкость набегающего потока. Температура торможения потока $T_0 = 295 \pm 1 \text{ К}$. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Исследования выполнялись на модели плоской пластины с острой передней кромкой, установленной в рабочей части под нулевым углом атаки. Ширина модели — 200 мм (во всю ширину рабочей части Т-325), длина — 370 мм. Координата x направлена вдоль потока и отсчитывается от передней кромки модели, координата z направлена вдоль кромки модели и отсчитывается от середины модели. В Т-325 при указанных параметрах потока на модели плоской пластины с острой передней кромкой ламинарно-турбулентный переход наблюдается при числе Рейнольдса, рассчитанном по толщине пограничного слоя, $Re_\delta = (Re_1 x)^{0.5} > 1100$.

Экспериментальная модель оборудована двумя источниками контролируемых возмущений. Источники располагались в центральной области модели в 30 мм от передней кромки ($Re_\delta \approx 424$). Расстояние между источниками составляло 6 мм (координаты источников $z_{s1,2} = \pm 3 \text{ мм}$). Такое расстояние обосновывается технической возможностью установки источников на модель, характерными масштабами локализованных возмущений, генерируемых аналогичными источниками (10–20 мм в трансверсальном направлении [7, 8]), а также расчетами [24], в которых для этого случая получено наибольшее нарастание возмущений малой амплитуды. Источником возмущений выступает импульсный тлеющий разряд, зажигающийся между двумя изолированными друг от друга и модели электродами. Изолятор и электроды выведены на поверхность модели и отшлифованы заподлицо, центры электродов находятся на линии, параллельной направлению набегающего потока.

Схема зажигания тлеющего разряда условно представлена на рис. 2. Она основана на коммутации постоянного высокого напряжения с помощью быстродействующих высоковольтных ключей, которые управлялись импульсными сигналами с двухканального генератора. Во всех представляемых экспериментах частота зажигания разряда в экспериментах составляла 312.5 Гц, длительность горения — 25 мкс. С помощью 4-х канального осциллографа регистрировались напряжения на электродах источника, что позволило определить падение напряжения на электродах и ток разряда. В экспериментах падение напряжения на электродах во время горения разряда составляло 640–690 В, ток разряда — 14–16 мА. Высокое напряжение на электродах и ток разряда указывают на то, что в этих исследованиях наблюдается тлеющий режим горения. Электрическая энергия на разряде в одном импульсе составляет 0.2–0.3 мДж.

Пулсации и среднее течение пограничного слоя измерялись с помощью однопровиточного датчика термоанемометра постоянного сопротивления. Датчик был изготовлен из вольфрамовой

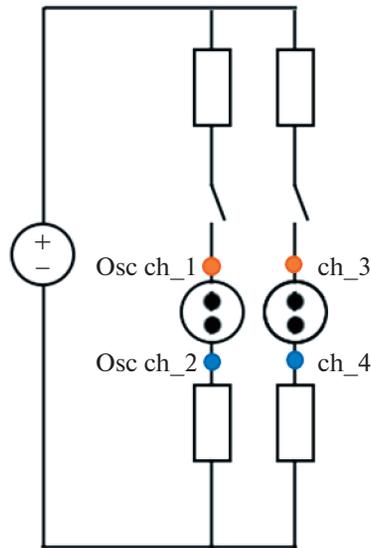


Рис. 2. Схема зажигания разрядов.

проволоки длиной около 1.7 мм и диаметром 10 микрон. Перегрев нити составлял 0.8, в этом случае сигнал термоанемометра связан в основном с пульсациями массового расхода [25].

Среднее напряжение термоанемометра измерялось с помощью цифрового вольтметра. Пульсационный сигнал термоанемометра и управляющие зажиганием разряда импульсные сигналы одновременно записывались 4-х канальным аналого-цифровым преобразователем L-card E20-10. В каждой точке измерения регистрировались 4 реализации сигналов длиной около 0.4 с каждая с частотой дискретизации 2.5 МГц на каждый канал. При обработке исходных данных записанные сигналы разделялись на 520 реализаций “пролета” возмущений от разряда с последующим синхронным осреднением, что позволило выделить контролируемые возмущения от разрядов от фона случайных естественных пульсаций пограничного слоя. Разделение сигнала термоанемометра проводилось по фронтам управляющего разрядом сигнала.

В данных исследованиях измерения термоанемометром проводились в трансверсальном направлении (вдоль z координаты) на расстоянии 80 мм ($Re_\delta \approx 693$) от передней кромки экспериментальной модели в сверхзвуковой части пограничного слоя в области максимального уровня естественных пульсаций. В области измерений средний массовый расход $\rho U \approx 0.7\rho U_\infty$, где ρU_∞ – массовый расход набегающего потока.

Из измеренных данных определялись пульсации массового расхода, нормированные на среднее локальное течение

$$m'(t) = \frac{(\rho U)'}{(\rho U)_{loc}} \times 100\% = \frac{e'(t)}{E \cdot Q} \times 100\%$$

Здесь $e'(t)$ – пульсационный сигнал, E – среднее напряжение термоанемометра, $Q = 0.25$ – коэффициент чувствительности к пульсациям массового расхода [25].

Для изучения частотно-волновой структуры возбуждаемых источниками контролируемых возмущений анализировались амплитудные спектры пульсаций, полученные с помощью дискретного преобразования Фурье. Также для различных частот анализировались амплитудные спектры по поперечному волновому числу β :

$$A_{f\beta}(f, \beta) = \left| \frac{\sqrt{2}}{T \cdot \delta_0} \sum_{l,k} m'(z_l, t_k) \exp(i2\pi f t_k - \beta z_l) \Delta t \Delta z \right|$$

где $T = 1$ мс – длительность анализируемых осциллограмм, $\delta_0 = 1$ мм – характерная толщина пограничного слоя в области измерений.

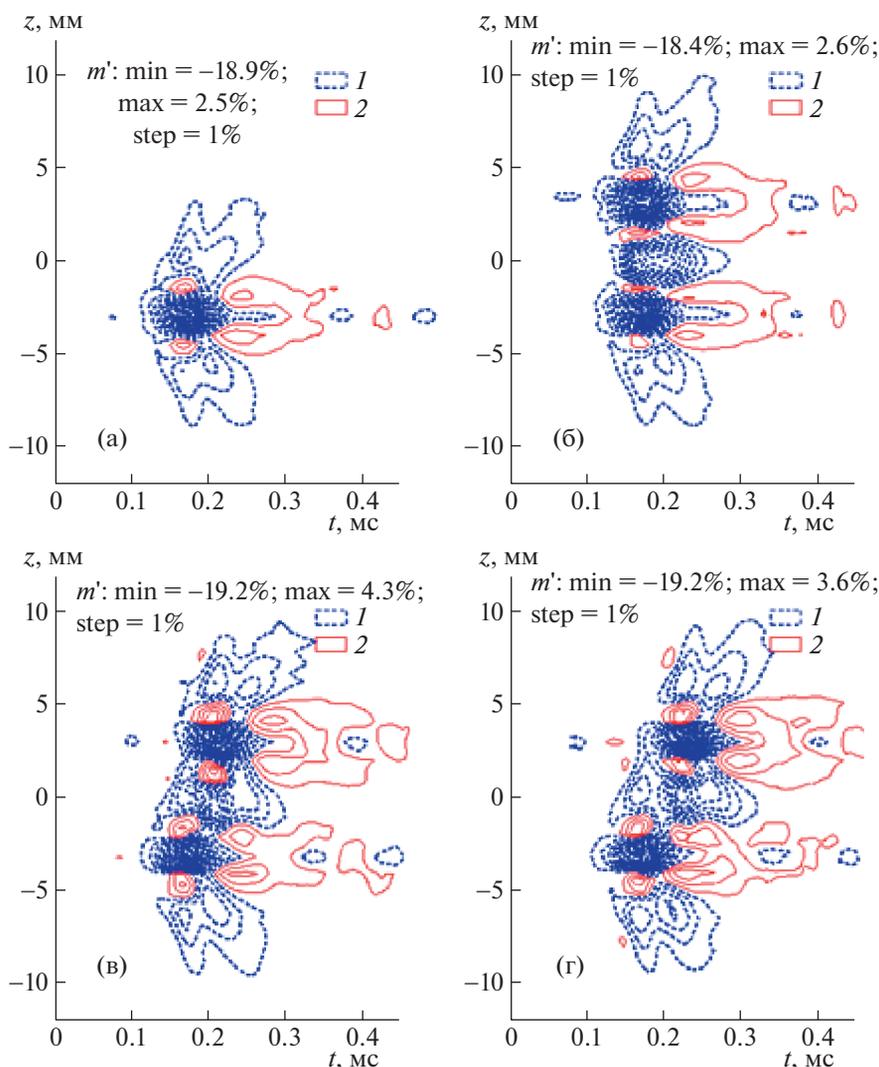


Рис. 3. Изолинии пульсаций массового расхода (m') контролируемых возмущений в плоскости (z, t): одиночный источник (а); два синхронных источника (б); два источника с временной задержкой 40 мкс (в); два источника с временной задержкой 60 мкс (г); 1 – отрицательные пульсации; 2 – положительные пульсации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Были проведены измерения при четырех вариантах работы источников: при работе одного источника, при синхронной работе двух источников и при временной задержке зажигания разрядов в 40 и 60 мкс. На рис. 3 представлены экспериментальные данные в виде изолиний пульсаций массового расхода в плоскости (z, t), измеренные на расстоянии 80 мм от передней кромки модели при работе одного источника, двух синхронных источников и в случае работы источников с временной задержкой.

В случае одиночного источника в области измерений возмущение от разряда в поперечном направлении имеет размер около 10 мм и симметрично относительно положения источника в поперечном направлении ($z = -3$ мм). В структуре возмущения можно выделить следующие составляющие: центральный дефект на линии за источником ($z = -3$ мм), наблюдается максимальное мгновенное отклонение массового расхода от среднего значения и составляет около 19% от локального базового течения; боковые отрицательные пульсации с максимальной амплитудой около 3% при $z \approx 0$ и -6 мм, фронт этих пульсаций имеет наклон; положительные пульсации с максимальным отклонением от среднего течения при $z \approx -2$ и -4 мм. В целом наблюдаемая структура возмущений от одиночного импульсного разряда согласуется с предыдущими экспе-

риментальными результатами [7, 8], несмотря на то, что амплитуда центрального дефекта отличается, что связано с большей энергией разряда в настоящей работе.

В случае синхронного зажигания двух импульсных разрядов в $z = \pm 3$ мм, как и в случае одиночного источника, выделяются высокоинтенсивные дефекты течения от разрядов, боковые отрицательные и положительные пульсации. В области $z = 0$ мм наблюдается наибольшее отличие в структуре генерируемого возмущения от случая одиночного источника – дефект с максимальным отклонением от среднего течения около 9%. На внешней границе возмущений амплитуда и форма пульсаций неизменны. Аналогичная картина, когда отличия в структуре контролируемых возмущений наблюдаются только в области между источниками, наблюдалась в численном моделировании генерации в сверхзвуковом пограничном слое возмущений от двух импульсных источников [24], а также в исследованиях для случая периодических возмущений от двух источников [23].

При наличии временной задержки в работе импульсных источников (разряд в $z = 3$ мм зажигается позже разряда в $z = -3$ мм) отличия в форме пульсаций также наблюдаются только в области между источниками, а возмущение в целом приобретает наклонный характер.

На рис. 4 представлены осциллограммы пульсаций массового расхода (а, в, д) и их амплитудно-частотные спектры (б, г, е) для различных областей возмущений при разных режимах работы разрядов. В области $z \approx -6$ мм (рис. 4а, б) пульсации по форме близки во всех случаях. Амплитуда пульсаций совпадает в случаях зажигания одного и двух синхронных разрядов, тогда как в экспериментах с временной задержкой наблюдаются пульсации с большей амплитудой. Это обусловлено погрешностью измерений, связанной с тем, что из-за разрушения датчик термоанемометра был заменен на другой, что привело к необходимости повторно устанавливать положение датчика в пограничном слое и позиция датчика относительно поверхности модели была изменена, т.е. измерения были проведены в несколько отличном слое. Спектры пульсаций также близки во всех случаях. Частотный состав пульсаций в этой области ограничивается диапазоном до примерно 30 кГц. Выделяется пик в области частот 12–30 кГц, по расчетам [24] в этой области наблюдается наибольшее нарастание возмущений при линейном развитии.

В области $z \approx -3$ мм (рис. 4в, г), которая соответствует измерениям за одним из разрядов, во всех случаях наблюдается высокоинтенсивный дефект массового расхода, близкий во всех режимах по форме и амплитуде. Частотные спектры во всех случаях также близки. В спектрах не наблюдаются выделенные пики, и амплитуды значительно превышают уровень шума только в области до 40 кГц.

При $z \approx 0$ мм (рис. 4д, е), где наблюдаются наибольшие отличия в структуре возмущений от одиночного и двух разрядов, в случае одиночного разряда осциллограмма пульсаций и спектр близки по форме и амплитуде результатам, полученным при $z \approx -6$ мм (рис. 4а, б). В случае одновременного зажигания разрядов форма осциллограмм и частотный состав не изменяются, а амплитуда пульсаций увеличивается приблизительно в три раза по сравнению со случаем одиночного разряда. Временная задержка в зажигании разрядов приводит к изменению формы и спектрального состава возмущений. При задержке в 40 мкс пик в высокочастотной (12–30 кГц) области спектра значительно смещен в область высоких частот по сравнению со случаями одиночного и двух синхронных источников. При увеличении временной задержки в зажигании разрядов до 60 мкс смещение этого пика относительно случая синхронного зажигания разряда не наблюдается.

Можно заключить, что в случае двух источников, расположенных параллельно передней кромке, наибольшие отличия в структуре возмущений от разрядов по сравнению со случаем одиночного источника наблюдаются в центральной области. В исследуемой конфигурации источников имеется возможность влиять на амплитудно-частотный состав генерируемых возмущений с помощью временной задержки.

На рис. 5 представлены частотно-волновые спектры возмущений, вводимых в пограничный слой разрядами, в виде изолиний амплитуд в плоскости (f, β) . В случае одиночного источника (рис. 5а) наибольшую амплитуду имеют волны с поперечными волновыми числами в области $\beta = \pm 1-2$ рад/мм, т.е. наклонные по отношению к набегающему потоку волны. Отметим, что в исследованиях [24] численным моделированием развития возмущений малой амплитуды при близких параметрах потока в пограничном слое пластины наиболее нарастающими являются волны с $\beta \approx \pm 0.9$ рад/мм, что отличается от наиболее интенсивных волн в составе возмущений в данных экспериментах. Это отличие может быть связано с тем, что в данных экспериментах возмущения не являются малыми и в их нарастании могут проявляться нелинейные эффекты. Помимо этого, возможно, что используемый источник контролируемых возмущений изначально

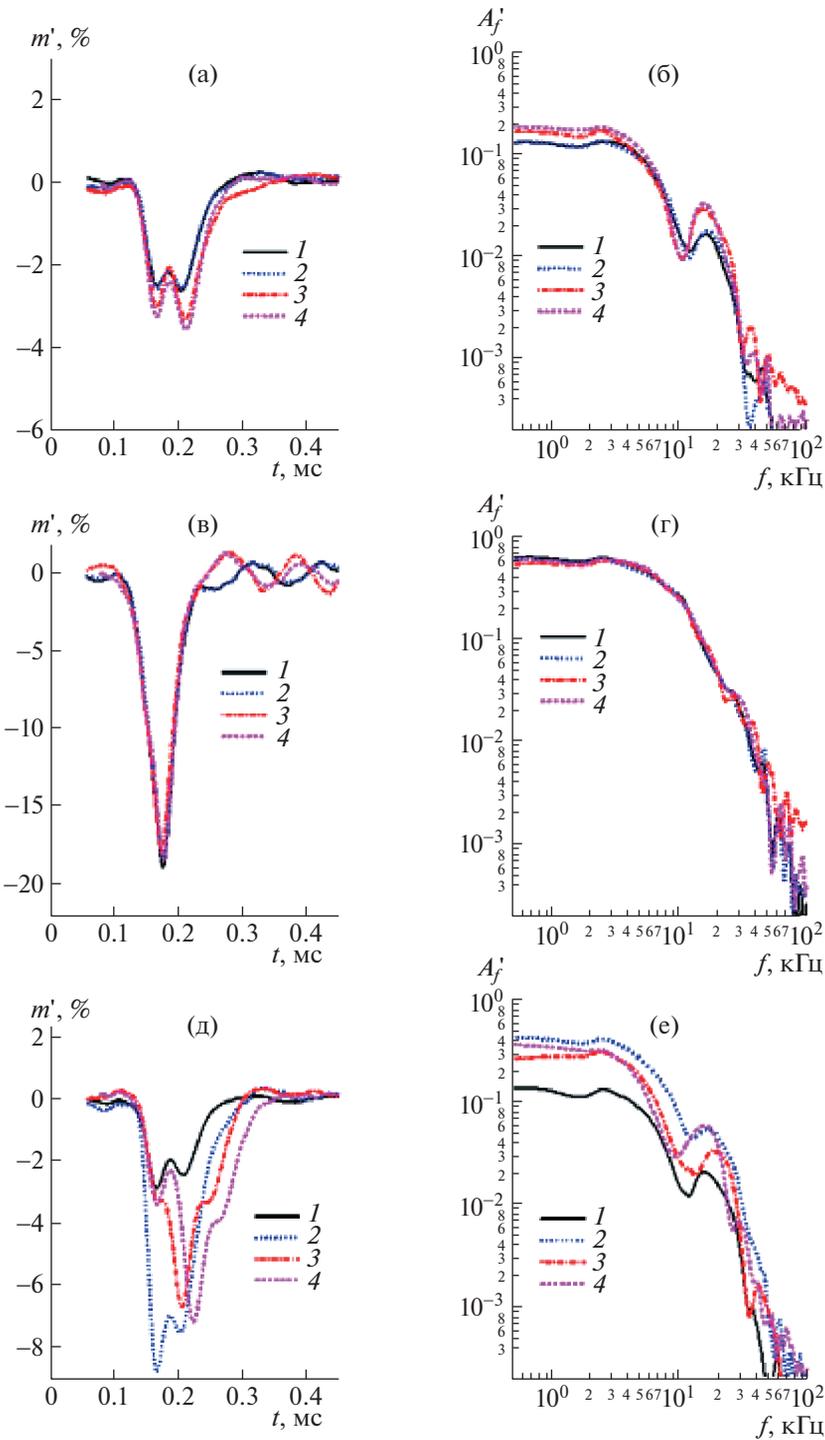


Рис. 4. Осциллограммы (а, в, д) и амплитудно-частотные спектры (б, г, е) пульсаций в $z \approx -6$ мм (а, б), -3 мм (в, г) и 0 мм (д, е): 1 – одиночный источник; 2 – два синхронных источника; 3 – два источника с временной задержкой 40 мкс; 4 – два источника с временной задержкой 60 мкс.

но вводит в пограничный слой возмущение, в составе которого волны с большими β имеют большую амплитуду.

В случае одновременного зажигания двух разрядов (рис. 5б) в спектре вводимых контролируемых возмущений наблюдаются пучности и узлы. При этом для различных частот их положения одинаковы. Аналогичное появление узлов и пучностей в волновом спектре возмущений наблюдалось в расчетах [24], при этом значения β , при которых наблюдаются узлы, такие же как в данных экспериментах.

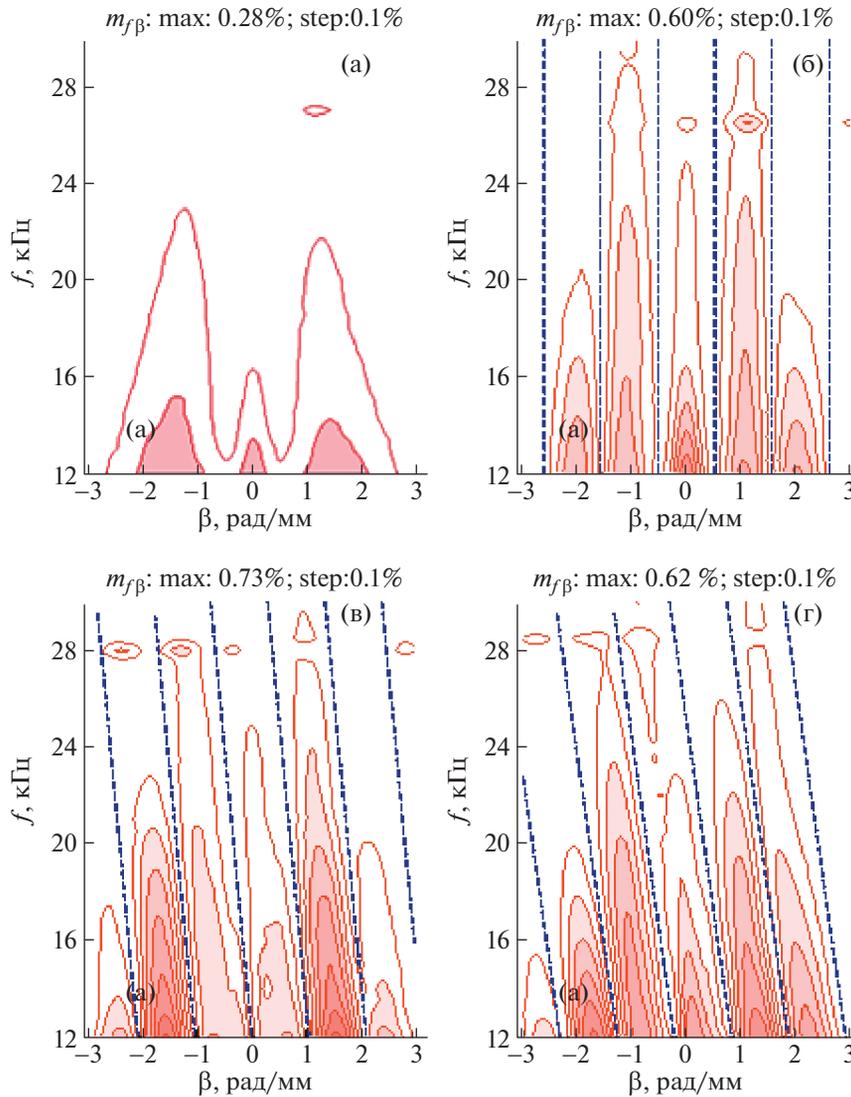


Рис. 5. Частотно-волновые спектры контролируемых возмущений: одиночный источник (а); два синхронных источника (б); два источника с временной задержкой 40 мкс (в); два источника с временной задержкой 60 мкс (г).

При наличии временной задержки в работе источников контролируемых возмущений (рис. 5в, г) в частотно-волновых спектрах также наблюдаются узлы и пучности, однако значения поперечной проекции волнового вектора β , при которых они наблюдаются, зависят от частоты. Эта зависимость меняется при варьировании временной задержки.

Узлы и пучности в амплитудных волновых спектрах наблюдались ранее в численных и экспериментальных исследованиях по развитию периодических [23] и локализованных [24] возмущений от двух разнесенных в пространстве источников в сверхзвуковом пограничном слое. Наличие узлов и пучностей может быть объяснено интерференцией волн от источников. Возмущение, порожденное на конкретной частоте одним источником, может быть представлено в виде суммы плоских волн с различными волновыми числами и амплитудами. Тогда результат их наложения представляется в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 & \sum_j A_j \cdot \cos(2\pi f t + \beta_j(z - z_0) + \alpha_j x) + \\
 & + \sum_j A_j \cdot \cos(2\pi f(t + \tau) + \beta_j(z + z_0) + \alpha_j x) = \\
 & = 2 \sum_j A_j \cdot \cos\left(2\pi f\left(t + \frac{\tau}{2}\right) + \beta_j z + \alpha_j x\right) \cos(\pi f \tau + \beta_j z_0)
 \end{aligned}$$

где α и β – продольное и поперечное волновое число, τ – временная задержка в работе источников, $z_0 = 3$ мм – половина расстояния между источниками. Последний множитель в правой части выражения определяет положение пучностей и узлов в амплитудном волновом спектре. Их расположение в спектре определяется расстоянием между источниками и задержкой в их работе. Нулевой амплитуде (узлам) соответствуют значения $\beta = \pi \cdot (0.5 + n - f\tau)/z_0$, где n – целое число, а угол наклона ϕ линий, на которых расположены узлы в плоскости (f, β) , может быть определен как $\phi = \text{arctg}[-z_0/(\pi\tau)]$. На рис. 5б, в и г результаты расчетов положения узлов в плоскости (f, β) представлены прерывистыми линиями. Как видно, в волновых спектрах возмущений от импульсных разрядов положение узлов хорошо согласуется с приведенными выше выкладками по интерференции волн.

Отметим, что в работах [23] и [24], в которых наблюдались такие же эффекты при формировании контролируемых возмущений в сверхзвуковом пограничном слое от двух разнесенных источников, исследования проведены для возмущений малой амплитуды, развитие которых согласовывалось с линейной теорией устойчивости. В экспериментах, результаты которых впервые представляются в данной работе, амплитуда возмущений выше, однако также наблюдаются узлы и пучности, а их положения хорошо предсказываются интерференцией волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развит новый метод введения контролируемых возмущений в сверхзвуковой пограничный слой с помощью двух импульсных тлеющих разрядов. Проведены экспериментальные исследования формирования локализованных возмущений от одного и двух источников в пограничном слое пластины при числе Маха $M = 2$ при различных временных задержках в их работе. Источники возмущений располагались на линии параллельной передней кромке модели пластины.

Показано, что наибольшие отличия в структуре возмущений от одного и двух источников наблюдаются в центральной области, тогда как на боковых границах возмущения пульсации близки во всех рассматриваемых случаях. Временная задержка в работе источников приводит к изменению амплитудно-частотного состава возмущений от разрядов.

В случае работы двух источников в частотно-волновой структуре возмущений формируются узлы и пучности, положение которых в плоскости (f, β) определяется расстоянием между источниками и временной задержкой в зажигании разрядов. Качественно это может быть описано линейной интерференцией волн от двух источников. Экспериментально показано, что варьированием временной задержки в зажигании разрядов можно изменять частотно-волновую структуру контролируемых возмущений.

С помощью полученных в работе результатов можно конфигурировать источники так, чтобы вводить в пограничный слой контролируемые возмущения сложного частотно-волнового спектра.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00097, <https://rscf.ru/project/21-79-00097/>. Работа выполнена на базе ЦКП “Механика” ИТПМ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косинов А.Д., Маслов А.А. Развитие искусственно вызванных возмущений в сверхзвуковом пограничном слое // Изв. АН СССР. МЖГ. 1984. № 5. С. 37–43.
2. Kosinov A.D., Maslov A.A., Shevelkov S.G. Experiments on the stability of supersonic laminar boundary layers // J. Fluid Mech. 1990. V. 219. P. 621–633. <https://doi.org/10.1017/S0022112090003111>
3. Bountin D., Shipluk A., Maslov A. Evolution of nonlinear processes in a hypersonic boundary layer on a sharp cone // J. Fluid Mech. 2008. V. 611. P. 427–442. <https://doi.org/10.1017/S0022112008003030>
4. 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. № 2. С. 58–68.
5. Kosinov A.D., Kolosov G.L., Semionov N.V., Yermolaev Y.G. Linear development of controlled disturbances in the supersonic boundary layer on a swept wing at Mach 2 // Phys. Fluids. 2016. V. 28. Art. No. 064101. 16 p. <https://doi.org/10.1063/1.4952999>
6. 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. V. 756. P. 1058–1091. <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.475>
7. 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. № 1. С. 17–28.

8. *Yatskikh A., Yermolaev Y., Kosinov A., Semionov N., Semenov A.* Evolution of localized artificial disturbance in 2D and 3D supersonic boundary layers // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 2020. V. 234. № 1. P. 115–123.
<https://doi.org/10.1177/0954410018787120>
9. *Довгаль А.В., Катасонов М.М., Козлов В.В., Павленко А.М.* Эволюция локализованных возмущений пограничного слоя в условиях ламинарно-турбулентного перехода (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29. № 4. С. 491–506.
10. *Mayer C.S., Wernz S., Fasel H.F.* Numerical investigation of the nonlinear transition regime in a Mach 2 boundary layer // J. Fluid Mech. 2011. V. 668. P. 113–149.
<https://doi.org/10.1017/S0022112010004556>
11. *Mayer C.S., Laible A.C., Fasel H.F.* Numerical investigation of wave packets in a Mach 3.5 cone boundary layer // AIAA J. 2011. V. 49. № 1. P. 67–86.
<https://doi.org/10.2514/1.J050038>
12. *Egorov I.V., Novikov A.V.* Direct numerical simulation of laminar–turbulent flow over a flat plate at hypersonic flow speeds // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2016. V. 56. P. 1048–1064.
<https://doi.org/10.1134/S0965542516060129>
13. *Чувахов П.В., Егоров И.В.* Численное моделирование эволюции возмущений в сверхзвуковом пограничном слое над углом разрежения // Изв. РАН. МЖГ. 2021. № 5. С. 49–60.
<https://doi.org/10.31857/S0568528121050029>
14. *Егоров И.В., Новиков А.В., Чувахов П.В.* Численное моделирование развития турбулентных пятен в сверхзвуковом пограничном слое на пластине // Матем. моделирование. 2022. Т. 34. № 7. С. 63–72.
<https://doi.org/10.20948/mm-2022-07-04>
15. *Хотяновский Д.В., Кудрявцев А.Н.* Прямое численное моделирование перехода к турбулентности в сверхзвуковом пограничном слое на гладких и шероховатых поверхностях // Прикл. механика и техн. физика. 2017. Т. 58. № 5. С. 80–92.
<https://doi.org/10.15372/PMTF20170508>
16. *Хотяновский Д.В., Кудрявцев А.Н.* Прямое численное моделирование перехода к турбулентности в сверхзвуковом пограничном слое // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 5. С. 581–590.
17. *Чувахов П.В., Погорелов И.О.* Источники турбулентности на прямом крыле сверхзвукового пассажирского самолёта // Матем. моделирование. 2022. Т. 34. № 8. С. 19–37.
<https://doi.org/10.20948/mm-2022-08-02>
18. *Гилев В.М., Козлов В.В.* Влияние периодического вдува-отсоса на процесс перехода в пограничном слое // Уч. записки ЦАГИ. 1986. Т. 17. № 3. С. 27–33.
19. *Borodulin V.I., Kachanov Y.S.* On properties of the deterministic turbulence and reproducibility of its instantaneous and statistical characteristics // Theoretical and Applied Mechanics Letters. 2014. V. 4. № 6. Art. No. 062004. 19 p.
<https://doi.org/10.1063/2.1406204>
20. *Бойко А.В., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.* Исследование слабонелинейного развития нестационарных вихрей Гёртлера // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 4. С. 487–514.
21. *Borodulin V.I., Kachanov Y.S.* Experimental evidence of deterministic turbulence // Eur. J. Mech. B/Fluids. 2013. V. 40. P. 34–40.
<https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2013.02.004>
22. *Corke T.C., Cavalieri D.A., Matlis E.* Boundary-layer instability on sharp cone at Mach 3.5 with controlled input // AIAA J. 2002. V. 40. P. 1015–1018.
<https://doi.org/10.2514/2.1744>
23. *Kolosov G.L., Kosinov A.D., Semenov A.N., Yatskikh A.A.* Experimental and numerical investigation of controlled disturbances development from two sources in supersonic boundary layer // Advances in Aerodynamics. 2019. V. 1. Art. № 14. 13 p.
<https://doi.org/10.1186/s42774-019-0017-4>
24. *Яцких А.А., Афанасьев Л.В.* Численное моделирование эволюции локализованных возмущений от двух синхронных разнесенных источников в сверхзвуковом пограничном слое // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29. № 6. С. 923–934.
25. *Yatskikh A.A., Kosinov A.D., Semionov N.V., Smorodsky B.V., Ermolaev Yu.G., Kolosov G.L.* Investigation of laminar-turbulent transition of supersonic boundary layer by scanning constant temperature hot-wire anemometer // AIP Conf. Proc. 2018. V. 2027. Art. No. 040041. 5 p.
<https://doi.org/10.1063/1.5065315>