Научная статья

УДК 532.526 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-95-110

Экспериментальное исследование развития волнового поезда в продольном следе в пограничном слое плоской пластины при числе Maxa 2,5

Марина Владимировна Питеримова¹, Александр Дмитриевич Косинов² Николай Васильевич Семёнов³, Алексей Анатольевич Яцких⁴ Александра Валерьевна Шмакова⁵, Юрий Геннадьевич Ермолаев⁶ Борис Владимирович Смородский⁷

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

¹piterimova@itam.nsc.ru ²kosinov@itam.nsc.ru ³semion@itam.nsc.ru ⁴73.yatskikh@gmail.com ⁵avpanina@itam.nsc.ru ⁶yermol@itam.nsc.ru ⁷smorodsk@itam.nsc.ru

Аннотация

В работе рассматриваются экспериментальные результаты по развитию волнового поезда в продольном следе в пограничном слое плоской пластины при числе Maxa 2,5. Выполнен анализ пространственно-временных распределений и частотно-волновых спектров пульсаций, а также их волновых характеристик в линейной и слабонелинейной фазе развития волнового поезда в однородном и неоднородном пограничном слое при фиксированной мощности источника контролируемых возмущений. В ходе анализа результатов субгармонический резонанс не наблюдался. Разложение по волновому спектру стационарной неоднородности и экспериментальные данные о волновых характеристиках и спектрах возмущений позволили предложить варианты взаимодействия волн для режима наклонного перехода.

Ключевые слова

сверхзвуковой поток, экспериментальные исследования, плоская пластина, контролируемые возмущения, на-клонный переход

Финансирование

Работа выполнена по теме государственного задания. Эксперименты проведены с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

Для цитирования

Питеримова М. В., Косинов А. Д., Семёнов Н. В., Яцких А. А., Шмакова А. В., Ермолаев Ю. Г., Смородский Б. В. Экспериментальное исследование развития волнового поезда в продольном следе в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2,5 // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 95–110. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-95-110

© Питеримова М. В., Косинов А. Д., Семёнов Н. В., Яцких А. А., Шмакова А. В., Ермолаев Ю. Г., Смородский Б. В., 2024

Experimental Study of the Wave Train Development in a Longitudinal Trace in the Fat Plate Boundary Layer at Mach 2.5

Marina V. Piterimova¹, Alexander D. Kosinov², Nikolay V. Semionov³ Aleksey A. Yatskikh⁴, Alexandra V. Shmakova⁵, Yuri G. Yermolaev⁶ Boris V. Smorodsky⁷

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of SB RAS Novosibirsk, Russian Federation

> ¹piterimova@itam.nsc.ru ²kosinov@itam.nsc.ru ³semion@itam.nsc.ru ⁴73.yatskikh@gmail.com ⁵avpanina@itam.nsc.ru ⁶yermol@itam.nsc.ru ⁷smorodsk@itam.nsc.ru

Abstact

The paper discusses experimental results on the wave train development in a longitudinal trace in the flat plate boundary layer at Mach 2.5. An analysis of the spatiotemporal distributions and frequency-wave spectra of pulsations, as well as their wave characteristics in the linear and weakly nonlinear phase of the wave train development in a homogeneous and inhomogeneous boundary layer at a fixed power of the controlled disturbances source has been carried out. During the analysis of the results, no subharmonic resonance was observed. Expansion into the wave spectrum of a stationary inhomogeneity and experimental data on wave characteristics and disturbance spectra made it possible to propose options for wave interaction for oblique breakdown.

Keywords

supersonic flow, experimental studies, flat plate, controlled disturbances, oblique breakdown

Funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. The study was conducted at the Equipment Sharing Center «Mechanics» of ITAM SB RAS.

For citation

Piterimova M. V., Kosinov A. D., Semionov N. V., Yatskikh A. A., Shmakova A. V., Yermolaev Yu. G., Smorodsky B. V. Experimental study of the wave train development in a longitudinal trace in the fat plate boundary layer at Mach 2.5. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 95–110 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-95-110

Введение

Воздействие слабых ударных волн в виде N-волны на переднюю кромку плоской пластины с острой передней кромкой порождает стационарный продольный след в сверхзвуковом пограничном слое [1]. Сформировавшееся неоднородное в трансверсальном направлении течение изменяет механизмы ламинарно-турбулентного перехода в сверхзвуковом пограничном слое в сравнении с его однородным состоянием [2; 3]. Известно, что продольные следы (стрики) либо затягивают переход в пограничном слое вниз по потоку, либо сдвигают его вверх по течению, как отмечено в [2].

Намеренное введение продольных следов в пограничный слой актуально из-за их способности затягивать ламинарно-турбулентный переход (ЛТП), обычно в условиях высокого уровня турбулентности потока, что подтверждается при дозвуковых скоростях [4–8]. Это связано с изменением условий порождения мод пограничного слоя, их линейного развития и выделения наиболее растущих пульсаций, нелинейное взаимодействие которых разрушает ламинарное течение [9; 10]. Знание механизмов взаимодействия неустойчивых возмущений обычно существенно облегчает решение задач численного моделирования ЛТП и предсказание его положения в пограничном слое. При моделировании используются два метода: прямое численное моделирование на основе уравнений Навье – Стокса и проведение расчетов с использованием волнового подхода теории гидродинамической устойчивости. Экспериментальные данные востребованы при сравнении с теорией. Введение в сверхзвуковой пограничный слой искусственных волновых поездов позволяет получить требуемые для сравнения с расчетами экспериментальные данные [11]. Это реализуется с помощью анализа пространственно-временных распределений, частотно-волновых спектров пульсаций и их волновых характеристик в линейной и слабонелинейной фазе развития волнового поезда в однородном и неоднородном пограничном слое при условии фиксированной мощности локального источника контролируемых возмущений. Анализ данных позволяет определить возможные механизмы взаимодействия волн в однородном и неоднородном пограничном слое на плоской пластине и сравнить их друг с другом. В этом заключается основная цель данной работы, которая является четвертой в серии экспериментальных исследований, начатых в [12] при числе Маха 2.

Постановка эксперимента

Эксперименты проведены в сверхзвуковой аэродинамической трубе T325 ИТПМ СО РАН при числе Маха 2,5 и единичном числе Рейнольдса $Re_1 = \frac{U}{v}$ (8,0 ± 0,1) × 10⁶ м⁻¹.

Термоанемометром постоянного сопротивления (ТПС) измерялись средние и пульсационные характеристики потока. Датчик термоанемометра с помощью координатного устройства перемещался по пространству: вдоль потока по оси *x*, поперек набегающего потока по оси *z* и по вертикали по оси *y*. Перегрев нити датчика задавался примерно равным 1,8. Параметры течения в рабочей части T-325 регистрировались с помощью автоматизированной системы измерения. Постоянное напряжение на выходе термоанемометра (Е) измерялось с помощью мультиметра Agilent 34401A, а его переменная составляющая записывалась в память персонального компьютера 12-разрядным аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) с частотой дискретизации 750 кГц. В каждой точке по пространству проводилось по четыре измерения всех параметров потока и осциллограмм пульсаций длиной 65536 отсчетов. Осциллограммы синхронизировались с источником контролируемых измерений.

Использовалась плоская стальная пластина с источником контролируемых возмущений, которая ранее применялась в экспериментах по исследованию слабонелинейной эволюции волнового поезда в [13]. Модель длиной 450 мм, шириной 200 мм и толщиной 10 мм устанавливалась в рабочей части аэродинамической трубы под нулевым углом атаки. Радиус цилиндрической части передней кромки был (0,039 ± 0,002) мм. Передняя кромка имела скос в нижней части модели. Угол скоса составлял около 14°30'.

Для генерации контролируемых возмущений использовался высокочастотный тлеющий разряд в камере внутри модели, такой же, как описано в [11; 12]. Искусственные возмущения из электроразрядной камеры проникали в пограничный слой через отверстие диаметром 0,45 мм в поверхности пластины на удалении 35 мм от передней кромки. Для зажигания тлеющего разряда использовалось синусоидальное напряжение с генератора ГЗ-112/1 и усилитель мощности (200 Вт) с выходным трансформатором на напряжение амплитудой до 1000 В. Частота генератора поддерживалась стабильной в диапазоне $f_{reн} = 9992-9996$ Гц при измерениях в неоднородном пограничном слое и $f_{reн} = 9998$ Гц – в однородном. Зажигание разряда про-исходило дважды за период синусоидального сигнала, таким образом, основная частота контролируемых возмущений, вводимых в пограничный слой, составляла 2 × f_{ren} . При выполнении данных исследований электрическая мощность на источнике возмущений фиксировалась и была такой же, как в [11; 12].

Измерения *N*-волны выполнялись в свободном потоке перед моделью в сечении x = -10 мм. Внутри однородного и неоднородного пограничного слоя возмущения измерялись в сечениях x = 60, 100, 110 и 120 мм.

Для введения в поток *N*-волны использовалась двумерная ПВХ-лента, которая была наклеена на боковую стенку рабочей части трубы и вводила в поток пару слабых ударных волн. Лента имела ширину по потоку d = 7 мм, высоту h = 155 мкм, длину 150 мм и располагалась на расстоянии x = 230 мм от передней кромки модели. Неоднородность пограничного слоя в виде стационарного продольного возмущения порождалась воздействием *N*-волны на переднюю кромку пластины, как показано на рис. 1. После измерений в неоднородном пограничном слое клейкая лента удалялась со стенки рабочей части аэродинамической трубы, а стенка полировалась. Затем выполнялись измерения в однородном пограничном слое.



Рис. 1. Схема экспериментов с введением контролируемых возмущений в неоднородный пограничный слой. На рисунке обозначено: 1 и 2 – падающие слабые ударные волны; 3 – генератор слабых ударных волн; 4 – источник контролируемых возмущений; 5 и 6 – относительное изменение массового расхода в сечениях x = -10 и x = 60 мм

Fig. 1. Experimental set up with the introduction of controlled disturbances into an inhomogeneous boundary layer. The figure shows: *1* and 2 – incident weak shock waves; 3 –weak shock waves generator; 4 – controlled disturbances source; 5 and 6 – relative mass flow change in sections x = -10 and x = 60 mm

Траектория движения датчика термоанемометра в пограничном слое и теоретическая толщина пограничного слоя $\delta = 8, 7 \sqrt{\frac{x}{\text{Re}_1}}$ на уровне (ρU)_{0,99} в зависимости от координаты *x* приведены на рис. 2.

Обработка результатов термоанемометрических измерений осуществлялась программой, написанной в среде графического программирования LabVIEW.

Степень неоднородности среднего течения оценивалась по характеру изменения нормированной величины среднего массового расхода ρU вдоль трансверсальной координаты *z*. Количественно это изменение получается из данных измерения датчиком термоанемометра по пространству. Зависимость $\rho U(z)$ определяется из уравнения, выражающего связь среднего напряжения на выходе термоанемометра с массовым расходом в сверхзвуковом потоке [12]:

$$E^2 = L + N \cdot (\rho U)^n$$

где *L* и *N* – размерные калибровочные коэффициенты для конкретного датчика.

С учетом
$$n = 0,5$$
, получим: $\frac{\Delta(\rho U)}{(\rho U)} = 4 \frac{\Delta E}{E}$

Для данной постановки задачи процедура обработки экспериментальных данных допускает три различных варианта нормировки мгновенного значения пульсационного сигнала датчика термоанемометра: на локальные измеренные значение напряжения, среднее или медианное



Рис. 2. Положение датчика термоанемометра по y_1 и толщина пограничного слоя б по величине (ρU)_{0,99} в зависимости от *x*.

Fig. 2. The position of hot-wire probe on y_1 and boundary layer thickness δ by value $(\rho U)_{0.99}$ depending on x

значение [14]. В данной работе обработка данных осуществлялась с нормировкой на среднее значение напряжения. Для оценки волновых спектров интегрирование выполнялось по методу трапеций.

Частотно-волновые спектры контролируемых (периодических) возмущений определялись с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) в виде:

$$\tilde{A}(x_k,\beta,f_l) = \frac{\sqrt{2}}{\delta_0 \cdot T \cdot Q} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} A(x_k,z_j,t_n) \cdot e^{-i(\beta \cdot z_j - \omega_l \cdot t_n)} \Delta z_j \Delta t ,$$

где $\delta_0 \approx 1$ мм — масштаб толщины пограничного слоя для нормировки; *T* — длина реализации по времени; $Q \approx 0,25$ — коэффициент чувствительности датчика термоанемометра к пульсаци-

ям массового расхода; $A(x_k, z_j, t_n) = \frac{e'(x_k, z_j, t_n)}{E(x_k, z_j)}$ – мгновенная величина безразмерных пуль-

саций выходного сигнала термоанемометра; $\Delta z_j = z_j - z_{j+1}$; $\Delta t -$ шаг дискретизации по времени АЦП.

Использование ДПФ по времени вместо алгоритма быстрого преобразования Фурье вызвано необходимостью достижения высокой точности (не хуже $\pm 0,1$ Гц) оценки гармоник контролируемых возмущений.

Амплитуда и фаза возмущений находились после ДПФ по формулам:

$$A_{f\beta}(x_{k},\beta,f_{l}) = \left|\tilde{A}(x_{k},\beta,f_{l})\right|,$$

$$\Phi_{f\beta}(x_{k},\beta,f_{l}) = \operatorname{arctg}\left(-\frac{\operatorname{Im}\left[\tilde{A}(x_{k},\beta,f_{l})\right]}{\operatorname{Re}\left[\tilde{A}(x_{k},\beta,f_{l})\right]}\right).$$

Спектральные амплитуды стационарных возмущений рассчитывались с помощью ДПФ по формуле:

$$A_{\beta}(x_i,\beta) = \left| \frac{1}{Z_0} \sum_{j=1}^M A(x_i,z_j) e^{-i(\beta z_j)} z \right|,$$

где Z_0 – ширина области измерения и M – число измеренных точек, а $\Delta z = z_i - z_{i+1}$.

Процедура оценки амплитудно-волнового спектра проверена на данных с известными Фурье-образами.

Для отрисовки пространственно-временных изолиний гармоник использовалась реальная часть полученного Фурье-образа:

$$A_{f_k}(x_i, z_j, t_l) = \cos(2\pi f_k t_l) Re(\hat{A}(x_i, z_j, f_k))$$

Здесь t_l – временной ряд длиной от 0 до 200 мкс, количество точек в котором зависит от f_k .

Результаты экспериментов и их анализ

Измерения падающей *N*-волны при x = -10 мм, приведенные на рис. 3, показывают, что в поток вводилась пара слабых ударных волн амплитудой ± 3 %.



Рис. 3. Распределение нормированной величины среднего массового расхода по трансверсальной координате z

 Fig. 3. Distribution of the normalized value of the mean mass flow along the transversal coordinate z

Здесь величина (ρU)_{∞} определялась по показаниям измерительной системы T-325, а значение (ρU) – из термоанемометрических результатов.

Результаты измерений в однородном и неоднородном пограничном слое (ПС) модели по трансверсальной координате z приведены на рис. 4. В результате воздействия пары слабых ударных волн (в виде N-волны) на переднюю кромку плоской пластины в сверхзвуковом пограничном слое порождается продольное стационарное возмущение. Его характеризует распределение нормированного массового расхода по поперечной координате z, которое показано на рис. 4, б. Постановкой эксперимента предполагалось, что пространственный волновой пакет будет вводиться в продольный след, порожденный вторым фронтом N-волны (см. рис. 1). Координата z = 0 соответствует линии, на которой расположено отверстие источника контролируемых возмущений. Из рис. 4, б видно, что возмущение в пограничном слое имеет вид «перевернутой» *N*-волны. В области $z \approx 2$ мм в распределении массового расхода имеется характерный максимум, который связан с воздействием фронта *N*-волны. Рассматривая начальное распределение при x = 60 мм, будем считать, что продольная неоднородность порождается *N*-волной в области –4 мм < z < 15 мм. Данная область характеризуется достаточно плавным изменением полного массового расхода от z = -2 до 12 мм. Резкий характер изменения массового расхода имеется хо-вого расхода имеется в областях от –4 до –1,5 мм и от 12 до 15 мм.



Рис. 4. Распределение нормированной величины среднего массового расхода по трансверсальной координате z: *a* – однородный ПС; *б* – неоднородный ПС

Fig. 4. Distribution of the mean mass flow rate normalized value along the transversal coordinate z: a – homogeneous BL; b – inhomogeneous BL

Представление о развитии волнового поезда во времени можно получить из пространственно-временных изолиний амплитуды гармоник в плоскости (z, t). Отметим, что согласно амплитудным спектрам осциллограмм, источник контролируемых возмущений вводил в пограничный слой гармоники k = 1, 2, 3, 4 при x = 60 мм, однако при x = 100 мм и более наблюдались только возмущения при k = 2, 3, 4. Ниже приводятся данные только для второй гармоники. Результаты для более высокочастотных возмущений не позволяют оценить их волновые характеристики из-за их малой амплитуды.

На рис. 5–8 изображены изолинии амплитуды возмущений во времени в однородном (*a*) и неоднородном (*б*) пограничном слое, полученные в сечениях x = 60, 100, 110 и 120 мм для частоты f = 20 кГц.



Рис. 5. Изолинии амплитуды возмущений для частоты 20 кГц в поперечном направлении во времени при x = 60 мм: a – однородный ПС; б – неоднородный ПС

Fig. 5. Isolines of the disturbances amplitude for a frequency of 20 kHz in the transverse direction in time at x = 60 mm: a – homogeneous BL; b – inhomogeneous BL

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2



Puc. 6. Изолинии амплитуды возмущений для частоты 20 кГц в поперечном направлении во времени при x = 100 мм: a – однородный ПС; б – неоднородный ПС
 Fig. 6. Isolines of the disturbances amplitude for a frequency of 20 kHz in the transverse direction in time at x = 100 mm: a – homogeneous BL; b – inhomogeneous BL



Рис. 7. Изолинии амплитуды возмущений для частоты 20 кГц в поперечном направлении во времени при x = 110 мм: a – однородный ПС; б – неоднородный ПС *Fig.* 7. Isolines of the disturbances amplitude for a frequency of 20 kHz

in the transverse direction in time at x = 100 mm: a - homogeneous BL; b - inhomogeneous BL



Рис. 8. Изолинии амплитуды возмущений для частоты 20 кГц в поперечном направлении во времени при x = 120 мм: a – однородный ПС; б – неоднородный ПС *Fig.* 8. Isolines of the disturbances amplitude for a frequency of 20 kHz in the transverse direction in time at x = 120 mm: a – homogeneous BL; b – inhomogeneous BL

Результаты рис. 6, б свидетельствуют о начале взаимодействия контролируемых пульсаций по сценарию наклонного перехода. Формирование пакета стоячих волн в центре волнового поезда характерно для наклонного механизма взаимодействия и обнаруживается в данных, представленных на рис. 6, б в центральной области от 0 до z = +4 мм. Имеющаяся неоднородность течения несколько ускоряет данный механизм взаимодействия возмущений в сравнении с однородным течением, в котором этот процесс заметен только при x = 120 мм (см. данные на рис. 8, а). Однако реальное положение начала наклонного режима взаимодействия пульсаций можно будет уточнить из данных по волновым спектрам амплитуды. Как видно из изолиний амплитуды на рис. 5-8, волновой поезд в неоднородном и однородном пограничном слое практически симметричен относительно z = 0. Наблюдается искажение картины изолиний возмущений только при x = 110 мм, что, возможно, связано с воздействием твердых частиц на датчик термоанемометра во время проведения измерений. Эти результаты сильно отличаются от данных работы [12], в которой число Маха было равно 2, а волновой поезд порождался с противоположной стороны поперечной неоднородности. Отметим, что в [12] при x = 100 мм в неоднородном течении наблюдался только рост возмущений субгармонической частоты, а субгармонический резонанс не был сформирован. В данной работе субгармонический резонанс не наблюдается совсем. Возможно, данный факт является свидетельством в пользу разного влияния продольного возмущения, порожденного *N*-волной, на ЛТП в сверхзвуковом пограничном слое. Отметим, что в [15] численно получено, что стационарное возмущение, генерируемое 1-м (см. рис. 1) фронтом *N*-волны, приводит к смещению начала ламинарно-турбулентного перехода вверх по потоку, в то время как возмущение от 2-го фронта *N*-волны на положение начала перехода влияния не оказывает.

Далее рассматриваются оценки волновых спектров и дисперсионных зависимостей контролируемых возмущений. На рис. 9–12 изображены амплитудные (*a*) и фазовые (*б*) спектры по поперечному волновому числу β волнового пакета для частоты f = 20 кГц в сечениях x = 60, 100, 110 и 120 мм для однородного и неоднородного течения.

Из графиков на рис. 10–12, *а* видно, что максимальная спектральная амплитуда контролируемых возмущений в целом возрастает вниз по потоку как в однородном, так и неоднородном течении. Для однородного пограничного слоя при x = 100 мм она примерно в 3 раза превышает значения, полученные при x = 60 мм, однако при x = 110 и 120 мм величина амплитуды уменьшается. Для неоднородного пограничного слоя при x = 110 мм она только в 2,3 раза превышает значения, полученные при x = 60 мм.



Рис. 9. Амплитудные (a) и фазовые (б) спектры по β волнового поезда для частоты f = 20 кГц в сечении x = 60 мм для однородного и неоднородного ПС
 Fig. 9. Amplitude (a) and phase (b) spectra of wave train on β for frequency f = 20 kHz in cross section x = 60 mm for homogeneous and inhomogeneous BL







Рис. 11. Амплитудные (*a*) и фазовые (δ) спектры по β волнового поезда для частоты f = 20 кГц в сечении x = 110 мм для однородного и неоднородного ПС





Puc. 12. Амплитудные (*a*) и фазовые (δ) спектры по β волнового поезда для частоты f = 20 кГц в сечении x = 120 мм для однородного и неоднородного ПС *Fig. 12.* Amplitude (*a*) and phase (*b*) spectra of wave train on β for frequency f = 20 kHz in cross section x = 120 mm for homogeneous and inhomogeneous BL

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2 Установлено, что наиболее растущими являются волны с $\beta \approx \pm 0.8$ рад/мм в обоих случаях. Фазовые спектры (рис. 11, δ и 12, δ) при некоторых β имеют участки практически постоянных значений фазы при β от ± 1 до ± 3 рад/мм. Это означает, что волны с этими волновыми числами β локализованы в центре волнового пакета и усиливаются именно там.

Неоднородность течения в пограничном слое является затрудняющим фактором при анализе результатов с точки зрения волнового подхода. Однако в работе сделаны оценки продольного волнового числа α_r . Для этого построены зависимости фазы возмущений от координаты x для частоты 20 кГц с различными поперечными волновыми числами β . Поскольку нарастание фазы вниз по потоку рассматривается как линейное, то получалось рассмотреть до 3-х ее значений по x. Для оценки волновых характеристик возмущений частотой 20 кГц использовались фазовые спектры, представленные на рис. 10–12, δ . При помощи линейной аппроксимации для пар значений x (100, 120 мм), (100, 110 мм) и (110, 120 мм) вычислены значения продольного волнового числа: $\alpha_r = \frac{\Delta \Phi_{f\beta}}{\Delta x}$. Затем рассчитывалось средние значения α_r , приведенные на рис. 13 в виде зависимости продольного волнового числа β волнового

вектора в трансверсальном направлении для однородного (a) и неоднородного (δ) пограничного слоя.



 Рис. 13. Волновые характеристики для частоты f = 20 кГц: зависимость продольного волнового числа α, от волнового числа β волнового вектора в трансверсальном направлении:

 a – однородный ПС; б – неоднородный ПС

Fig. 13. Wave characteristics for frequency f = 20 kHz: dependence of the longitudinal wave number α_r on the wave number β of the wave vector in the transversal direction: a - homogeneous BL; b - inhomogeneous BL

Исходя из полученных данных, возможно сделать оценки углов наклона и фазовой скорости возмущений. Описанный выше подход хорошо зарекомендовал себя в случае однородного пограничного слоя [13]. Тем не менее в данной работе, несмотря на сложности, связанные с неоднородностью течения, удалось применить волновой подход и предложить условия синхронизма для механизма наклонного перехода, которые приведены в табл. 1 и 2. Первый триплет для механизма наклонного перехода

Table 1

Таблица 1

The first triplet for the oblique breakdown mechanism

п	<i>f</i> , кГц	β, рад/ мм	α _r , рад/ мм	χ, °
1	20	-0,7	0,39	-60,9
2	20	-1,5	0,34	-77,2
3	0	0,8	0,05	86,4

Таблица 2

Второй триплет для механизма наклонного перехода

Table 2

The second triplet for the oblique breakdown mechanism

п	<i>f</i> , кГц	β, рад/ мм	α _r , рад/ мм	χ, °
1	20	0,7	0,39	60,9
2	20	1,5	0,34	77,2
3	0	-0,8	0,05	-86,4

Выявлены типичные резонансные триплеты волн. На рис. 14, *a*, *б* представлены волновые спектры стационарного возмущения и основной гармоники при x = 120 мм. Стрелками на рис. 14 указаны задействованные пики. Для построения триплетов (рис. 15, *a*, *б*) использовались данные из табл. 1 и 2 соответственно.



Рис. 14. Волновые спектры стационарного возмущения и основной гармоники при x = 120 мм с указанием пиков: a - для первого триплета; $\delta - для$ второго *Fig. 14.* Wave spectra of stationary disturbance and fundamental harmonic at x = 120 mm, indicating peaks (*a*) for the first triplet; (*b*) for the second



Рис. 15. Предполагаемый триплет для взаимодействия основной волны и стационарного возмущения по данным из табл. 1 (а) и 2 (б)

Fig. 15. Estimated triplet for the interaction of the fundamental wave and a stationary disturbance according to data from Table 1 (*a*) and Table 2 (*b*)

Полученные результаты позволили зафиксировать механизм наклонного перехода в волновом поезде в условиях неоднородности течения. В соответствии с ними предлагается оценка волнового числа для стационарного возмущения по величине координаты *x*, в которой выпол-

нены измерения: $\alpha_r = \frac{2\pi}{x}$.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование механизмов взаимодействия волн в пограничном слое на плоской пластине при числе Maxa 2,5, течение в котором искажено продольным возмущением, порожденным на острой передней кромке парой слабых ударных волн.

По условиям экспериментов, единичное число Рейнольдса было $Re_1 = \frac{U}{U} = (8,0 \pm 0,1) \times 10^6 \text{ m}^{-1}$.

Выбор этого значения связан с уменьшенным уровнем шума в рабочей части T-325. В работе представлены результаты для возмущений частотой 20 кГц. Возмущения частотой 10 кГц обнаруживались в обоих случаях только при x = 60 мм. Поэтому субгармонический резонанс не наблюдался в представленных экспериментах.

Выполнен анализ пространственно-временных распределений и частотно-волновых спектров пульсаций, а также их волновых характеристик в линейной и слабонелинейной фазе развития волнового поезда в однородном и неоднородном пограничном слое при фиксированной мощности источника контролируемых возмущений.

Разложение по волновому спектру стационарной неоднородности и экспериментальные данные о волновых характеристиках и спектрах возмущений позволили предложить варианты взаимодействия волн для режима наклонного перехода.

Список литературы

- 1. Ваганов А. В., Ермолаев Ю. Г., Колосов Г. Л., Косинов А. Д., Панина А. В., Семенов Н. В., Яцких А. А. К воздействию падающей волны Маха на сверхзвуковой пограничный слой // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 1. С. 45–50.
- 2. Егоров И. В., Зыонг Н. Х., Нгуен Н. К., Пальчековская Н. В. Численное моделирование влияния волны Маха на ламинарно-турбулентный переход в сверхзвуковом пограничном слое // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 504, № 1. С. 36–40.
- Питеримова М. В., Косинов А. Д., Семёнов Н. В., Яцких А. А., Кочарин В. Л., Ермолаев Ю. Г. Экспериментальное исследование влияния пары слабых ударных волн на ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2 //

Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 2. С. 30–40. DOI: 10.25205/2541-9447-2022-17-2-30-40.

- 4. Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В. Возникновение турбулентности в пристенных течениях. Новосибирск: Наука, 1999. 327 с.
- 5. Matsubara M. and Alfredsson P. H. Disturbance growth in boundary layers subjected to free stream turbulence // J. Fluid Mech. 2001. Vol. 430. P. 149.
- Fransson J. H. M., Brandt L., Talamelli A. and Cossu C. Experimental and theoretical investigation of the nonmodal growth of steady streaks in a flat plate boundary layer // Physics of Fluids. 2004. Vol. 16. P. 36–27.
- Fransson J. H. M., Talamelli A., Brandt L., Cossu C. Delaying transition to turbulence by a passive mechanism // Physical Review Letters, American Physical Society. 2006. Vol. 96 (6). P. 064501. 10.1103/physrevlett.96.064501.
- 8. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов В. В. Моделирование полосчатых структур и возникновения турбулентного пятна в пограничном слое крыла при повышенной степени турбулентности набегающего потока // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 4. С. 585–598.
- 9. Гапонов С. А., Маслов А. А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках. Новосибирск: Наука, 1980. 144 с.
- 10. Качанов Ю. С., Козлов В. В., Левченко В. Я. Возникновение турбулентности в пограничном слое. Новосибирск: Наука, 1982. 151 с.
- Косинов А. Д., Семенов Н. В., Питеримова М. В., Яцких А. А., Ермолаев Ю. Г., Смородский Б. В., Шмакова А. В. Особенности развития волнового поезда в продольном возмущении сверхзвукового пограничного слоя // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Online first. DOI: 10.15372/PMTF202315394.
- 12. Косинов А. Д., Питеримова М. В., Шмакова А. В., Семенов Н. В., Ермолаев Ю. Г. Экспериментальное исследование эволюции контролируемых возмущений в продольном вихре, порожденном в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2 // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64, №4. С. 118–129. DOI: 10.15372/PMTF202215232
- Kosinov A. D., Semionov N. V., Shevel'kov S. G., Zinin O. I. (1994). Experiments on the Nonlinear Instability of Supersonic Boundary Layers // Lin S. P., Phillips W. R. C., Valentine D. T. (Eds) Nonlinear Instability of Nonparallel Flows. International Union of Theoretical and Applied Mechanics. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-85084-4 17
- Piterimova M. V., Kosinov A. D., Panina A. V., Semionov N. V., Ermolaev Yu. G., Yatskikh A. A. The controlled periodic impact on the longitudinal vortex in the boundary layer at Mach 2 // Journal of Physics: Conference Series: XVI All-Russian Seminar with international participation "Dynamics of Multiphase Media" (Novosibirsk, 30 Sept. – 5 Oct. 2019). Vol. 1404. S. 1.: IOP Publishing, 2019. 012094(6) p. DOI: 10.1088/17426596/1404/1/012094
- 15. Din Q. H., Egorov I. V., Fedorov A. V. Mach wave effect on laminar-turbulent transition in supersonic flow over a flat plate // Fluid Dynamics. 2018. Vol. 53, № 5. P. 690–701.

References

- Vaganov A. V., Ermolaev Yu. G., Kolosov G. L., Kosinov A. D., Panina A. V., Semionov N. V. and Yatskikh A. A. Impact of incident Mach Wave on Supersonic Boundary Layer. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2016, 23 (1): 45–50
- Egorov I. V., Duong N. H., Nguyen N. C. and Palchekovskaya N. V. Numerical Simulation of the Influence of a Mach Wave on the Laminar-Turbulent Transition in a Supersonic Boundary Layer. *Doklady Rossiiskoi Akademii Nauk*. Fizika, Tekhnicheskie Nauki 2022, 504(1): 36–40

- Piterimova M. V., Kosinov A. D., Semionov N. V., Yatskikh A. A., Kocharin V. L., Yermolaev Yu. G. Experimental study of effect of a pair of weak shock waves on laminarturbulent transition in the boundary layer of flat plate at Mach number 2. *Siberian Journal of Physics*. 2022; 17(2):30-40. (In Russ.) https://doi.org/10.25205/2541-9447-2022-17-2-30-40
- 4. **Boiko A. V., Grek G. R., Dovgal A. V., and Kozlov V. V.** The Origin of Turbulence in Near-Wall Flows. Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- 5. Matsubara M. and Alfredsson P. H. Disturbance growth in boundary layers subjected to free stream turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*. 2001, 430: 149
- 6. Fransson J. H. M., Brandt L., Talamelli A. and Cossu C. Experimental and theoretical investigation of the nonmodal growth of steady streaks in a flat plate boundary layer. *Physics of Fluids*. 2004, 16: 3627.
- 7. Fransson J. H. M., Talamelli A., Brandt L., Cossu Carlo. Delaying transition to turbulence by a passive mechanism. *Physical Review Letters, American Physical Society*, 2006, 96 (6): 064501.
- 8. Grek G. R., Katasonov M. M. & Kozlov V. V. Modelling of streaky structures and turbulentspot generation process in wing boundary layer at high free-stream turbulence. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2009, 15 (4): 549–561
- 9. Gaponov S. A. and Maslov A. A. Development of Disturbances in Compressible Flows. 1980, Nauka, Novosibirsk, 144 p. (In Russ)
- 10. Kachanov Yu.S., Kozlov V.V., Levchenko V.Ya. The turbulence origin in the boundary layer. 1982, Nauka, Novosibirsk, 151 p. (In Russ)
- Kosinov A. D., Semionov N. V., Piterimova M. V., Yatskikh A. A., Yermolaev Yu. G., Smorodsky B. V., Shmakova A. V. Features of the wave train development in a longitudinal disturbance of a supersonic boundary layer. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2023. ONLINE FIRST. DOI: 10.15372/PMTF202315394.
- 12. Kosinov A. D., Piterimova M. V., Shmakova A. V., Semionov N. V., Ermolaev Yu. G. Experimental study of evolution of controlled perturbations in a longitudinal vortex generated in a boundary layer on a flat plate at a Mach number M = 2. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2023, 64(4): 656-666.
- Kosinov A. D., Semionov N. V., Shevel'kov S. G., Zinin O. I. Experiments on the Nonlinear Instability of Supersonic Boundary Layers. 1994, In: *Lin, S.P., Phillips, W.R.C., Valentine, D.T.* (eds) Nonlinear Instability of Nonparallel Flows. International Union of Theoretical and Applied Mechanics. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-85084-4_17
- Piterimova M. V., Kosinov A. D., Panina A. V., Semionov N. V., Ermolaev Yu. G., Yatskikh A. A. The controlled periodic impact on the longitudinal vortex in the boundary layer at Mach 2. *Journal of Physics: Conference Series: XVI All-Russian Seminar with international participation "Dynamics of Multiphase Media" (Novosibirsk, 30 Sept. – 5 Oct. 2019). Vol. 1404. S.I.: IOP Publishing, 2019. 012094(6).* DOI: 10.1088/17426596/1404/1/012094
- 15. Din Q. H., Egorov I. V., Fedorov A. V. Mach wave effect on laminar-turbulent transition in supersonic flow over a flat plate. *Fluid Dynamics*. 2018, 53(5): 690–701.

Сведения об авторах

Питеримова Марина Валадимировна, младший научный сотрудник

Косинов Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук

Семёнов Николай Васильевич, доктор физико-математических наук

Яцких Алексей Анатольевич, кандидат физико-математических наук

Шмакова Александра Валерьевна, кандидат физико-математических наук

Ермолаев Юрий Геннадьевич, кандидат физико-математических наук Смородский Борис Владимирович, кандидат физико-математических наук

Information about the Authors

Marina V. Piterimova, Junior Researcher Alexander D. Kosinov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences Nikolay V. Semionov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences Aleksey A. Yatskikh, Candidate of Physical and Mathematical Sciences Alexandra V. Shmakova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences Yuri G. Yermolaev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences Boris V. Smorodsky, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

> Статья поступила в редакцию 28.02.2023; одобрена после рецензирования 05.12.2023;принята к публикации 12.03.2024 The article was submitted 28.02.2023; approved after reviewing 05.12.2023; accepted for publication 12.03.2024