

**ЛИНЕЙНОЕ РАЗВИТИЕ ВОЛНОВОГО ПОЕЗДА В СВЕРХЗВУКОВОМ
ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СКОЛЬЗЯЩЕГО КРЫЛА ПРИ ЧИСЛЕ МАХА $M=2$** **Колосов Г.Л.,****научный руководитель д-р физ.-мат. наук Косинов А. Д.*****Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО
РАН***

Поиск методов управления ламинарно-турбулентным переходом в трехмерных пограничных слоях – одна из важнейших задач аэрофизики и газовой динамики. Решение данного вопроса позволит значительно улучшить характеристики современной авиационной техники, т.к. ламинаризация течения повлечет за собой снижение сопротивления трения. Однако для важного случая трехмерного сверхзвукового пограничного слоя, реализуемого над скользящим крылом, все еще не проведено успешного сравнения экспериментальных результатов с теорией гидродинамической устойчивости.

Известно, что среди стадий перехода, включающего в себя восприимчивость к внешним возмущениям, их линейное усиление и нелинейное взаимодействие волн, вызывающее турбулизацию течения, область линейного развития по протяженности занимает значительную часть. Именно поэтому данному этапу должно быть уделено пристальное внимание. Попытки экспериментального исследования линейного развития возмущений, выполненные ранее, нельзя считать в полной мере успешными, т.к. наблюдались нелинейные эффекты с изменением среднего течения. Последний факт был связан с тем, что эксперименты выполнялись в контролируемых условиях, и вводимые искусственные возмущения не были достаточно малы, чтобы не влиять на развитие естественных возмущений. При этом рассмотрение эволюции только натуральных пульсаций имеет тот существенный недостаток, что при таком подходе невозможно получение волновых характеристик отдельных возмущений, и, как следствие, невозможно провести сравнение экспериментальных данных с расчетами по линейной и слабонелинейной теории гидродинамической устойчивости. Методика же введения в пограничный слой контролируемых возмущений на данный момент успешно использовалась только для двумерных течений. Исходя из сказанного, цель представленной работы – выполнить экспериментальное исследование развития контролируемых пульсаций в трехмерном пограничном слое на модели тонкого (3 % профиль) скользящего крыла при числе Маха 2 и получить волновые характеристики наиболее растущих возмущений в области их линейного развития.

Эксперименты выполнены в малошумной сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха $M=2$ и единичном числе Рейнольдса $Re_1 = 5,2 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$. В экспериментах использовалась модель скользящего крыла с острой передней кромкой и углом стреловидности 45° . Модель имела тонкий (3 %) плоско-выпуклый профиль с максимальной толщиной 12 мм. Модель скользящего крыла и выбранные системы координат показаны на рис. 1. Возмущения в потоке измерялись термоанемометром постоянного сопротивления (ТПС). Датчик термоанемометра изготавливался из вольфрамовой нити диаметром 10 мкм и длиной 1,5 мм. Пульсационный сигнал с выхода термоанемометра оцифровывался 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и затем записывался в ПК. Частота дискретизации АЦП составляла 750 кГц. В экспериментах записывались цифровые осциллограммы длиной 65536 точек. Для введения в пограничный слой контролируемых пульсаций использовался источник локализованных искусственных

возмущений, конструкция которого основана на высокочастотном тлеющем разряде в камере. Контролируемые пульсации вводились в пограничный слой через отверстие в рабочей поверхности модели диаметром 0,42 мм. Координаты отверстия: $x = 56,6 \pm 0,3$ мм от передней кромки модели и $z = 0$, что совпадает с центральной линией симметрии модели. Разряд зажигался на частоте 20 кГц.

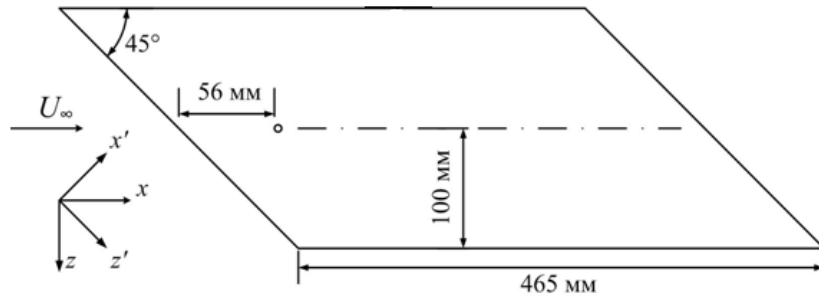


Рис. 1. Вид модели скользящего крыла и используемые системы координат.

Частотно-волновые спектры возмущений определялись с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ):

$$m_{f\beta} = \frac{\sqrt{2}}{T \delta_n} \sum_{j,k} m(z'_j, t_k) \cdot \exp[i(\beta' z'_j - \omega t_k)] \cdot \Delta t_k \cdot \Delta z'_j$$

где m – пульсации массового расхода, нормированные на средний массовый расход, T – длина реализации по времени; δ_n – масштаб толщины пограничного слоя для нормировки спектров по β , равный 1 мм. Амплитуда и фаза волны определялись по формулам:

$$A_{f\beta} = \sqrt{\text{Re}^2(m_{f\beta}) + \text{Im}^2(m_{f\beta})}$$

$$\Phi_{f\beta} = \text{arctg}\left[-\frac{\text{Im}(m_{f\beta})}{\text{Re}(m_{f\beta})}\right]$$

Волновые числа α_r продольной компоненты волнового вектора определялись из следующей оценки:

$$\alpha_r = \frac{\Delta \Phi_{f\beta}}{\Delta x}$$

где Δx – расстояние между измеряемыми сечениями в направлении оси x .

При выполнении экспериментов в контролируемых условиях необходимо определить в какой области развития возмущений находится источник искусственных пульсаций и к какому диапазону частот принадлежат возмущения, вводимые данным источником. Этот анализ возможен при рассмотрении эволюции натуральных пульсаций. Данные результаты приведены на рис. 2. Здесь продольная координата x отсчитывалась от передней кромки модели. На графике изображена спектральная мощность пульсаций массового расхода естественных возмущений, определенная как квадрат амплитуды, полученной после ДПФ. Получено, что естественные возмущения развиваются линейно до координаты x около 130 мм, или числа Рейнольдса, соответствующего этой координате, $\text{Re}_x \approx 0,67 \times 10^6$. При этом происходит усиление

частот в диапазоне от $f=7$ кГц до $f=30$ кГц. Таким образом, выбранные в данной работе условия для введения контролируемых возмущений (источник возмущения располагается на расстоянии 56 мм от передней кромки модели, частота зажигания разряда – $f=20$ кГц) соответствуют возмущениям, вводимым в линейной области развития пульсаций.

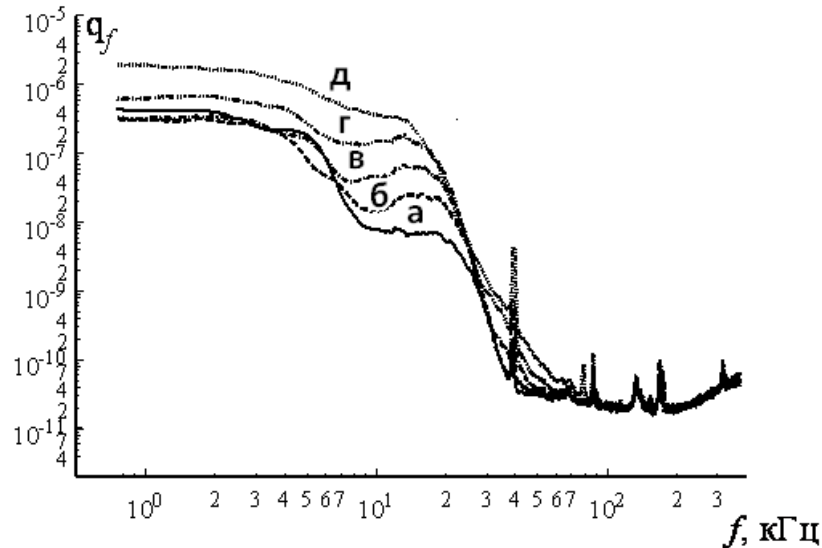


Рис. 2. Спектральная плотность мощности естественных возмущений, а – $x=96$ мм, б – $x=116$ мм, в – $x=136$ мм, г – $x=156$ мм, д – $x=182$ мм.

Измерения развития контролируемых возмущений проводились в пяти различных сечениях при фиксированной координате x' , путем перемещения датчика термоанемометра вдоль координаты z' , т.е. параллельно передней кромке модели при $x=20, 40, 50, 60, 70$ мм (расстояние от источника пульсаций). После Фурье-преобразования по времени получены амплитудно-фазовые распределения возмущений по пространству для основной частоты $f=20$ кГц. Мгновенную картину амплитуды пульсирующего волнового поля в пространстве можно представить через реальную часть Фурье образа для гармонической по времени волны:

$$m_f(x', z') = \sqrt{2}A_f(x', z')\cos [\Phi_f(x', z')]$$

Эти результаты для волнового поезда на частоте $f=20$ кГц приведены на рис. 3. Вниз по потоку происходит увеличение амплитуды возмущений, а также расплывание пакета волн в поперечном направлении, при этом центр волнового пакета смещается в сторону положительных значений координаты z' , что совпадает с направлением течения вдоль передней кромки.

На рис. 4, а приведены амплитудные спектры контролируемых возмущений для выбранной частоты, полученные после ДПФ по координате z' рассмотренных выше данных. В отличие от случая плоской пластины, имеется несимметричность амплитудных β -спектров. Наибольший рост амплитуды возмущений наблюдается при $\beta'=0,8-1,4$ рад/мм. Для всех сечений максимум амплитуды в спектрах по β' соответствует $\beta'=1,1$ рад/мм. Амплитудные и фазовые спектры по волновому числу β' поперечной компоненты волнового вектора позволяют оценить волновые характеристики неустойчивых возмущений: волновое число α_r' продольной компоненты волнового вектора, фазовые скорости, углы наклона волновых векторов,

длины волн в зависимости от β' . Дисперсионная зависимость $\alpha_r'(\beta')$ приведена на рис. 4, б. Определено, что зависимость $\alpha_r'(\beta')$ близка к линейной.

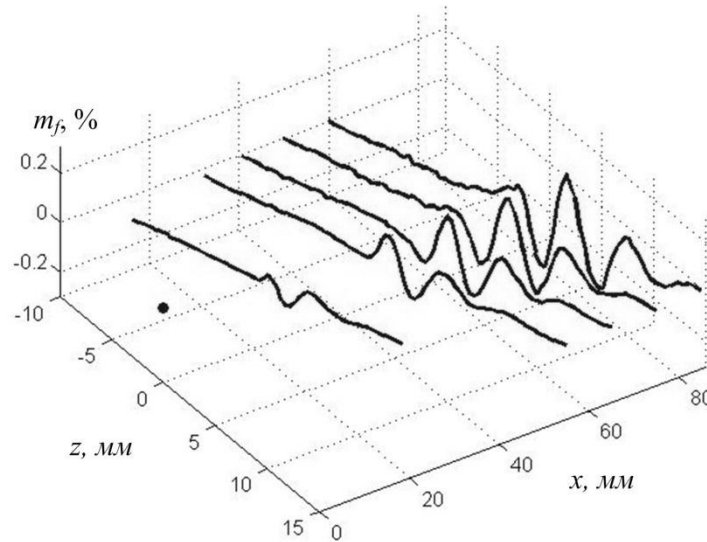


Рис. 3. Мгновенная картина амплитуды пульсаций для контролируемого волнового поля в пространстве на частоте $f=20$ кГц

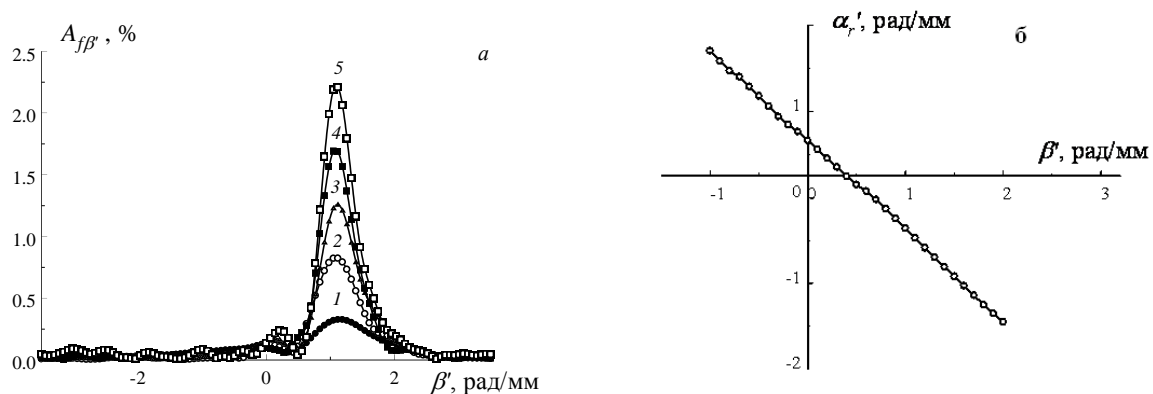


Рис. 4. а - амплитудные β -спектры возмущений на частоте $f=20$ кГц; 1 - $x=20$ мм, 2 - $x=40$ мм, 3 - $x=50$ мм, 4 - $x=60$ мм, 5 - $x=70$ мм; б - дисперсионная зависимость $\alpha_r'(\beta')$

Возмущения наибольшей амплитуды имеют угол наклона волнового вектора в плоскости (x,z) от 50° до 75° . Для наиболее растущих возмущений длина волны составила 14,2 мм; значение фазовой скорости, нормированной на скорость внешнего потока, - около 0,55. Получено, что наиболее растущими возмущениями являются возмущения при $\beta' = 1.1$ рад/мм, и их рост замедляется вниз по потоку. Представленные экспериментальные результаты могут служить для их количественного сравнения с линейной теорией гидродинамической устойчивости.