

УДК 532.526

## Особенности взаимокорреляционных характеристик возмущений в сверхзвуковом пограничном слое пластины при воздействии на переднюю кромку пары слабых ударных волн\*

Л.В. Афанасьев, А.А. Яцких, А.Д. Косинов, Н.В. Семенов

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

E-mail: l.afanasev@itam.nsc.ru

Представлены результаты экспериментальных измерений для оценки корреляционных характеристик возмущений пограничного слоя плоской пластины с острой передней кромкой и пульсаций набегающего потока в случаях естественных пульсаций и при воздействии на переднюю кромку N-волны для числа Маха 2. Цифровым методом получены параметры взаимной корреляции сигналов от двух термоанемометров постоянного сопротивления. Определены частотные диапазоны, в пределах которых имеется взаимосвязь пульсаций массового расхода, измеряемого датчиками.

**Ключевые слова:** пограничный слой, корреляционные измерения, квадрат функции когерентности, N-волна.

### Введение

Боковые слабые ударные волны при воздействии на течение в окрестности передней кромки формируют искаженное вниз по потоку течение в пограничном слое на плоской пластине [1]. Этот эффект зависит от радиуса притупления передней кромки модели [2]. Достоверно известно, что при попадании пары слабых ударных волн на притупленную переднюю кромку плоской пластины в пограничном слое образуется пара вихрей [3]. Для случая острой передней кромки в [4–7] показано, что воздействие слабых ударных волн имеет менее выраженный эффект порождения вихрей, чем для пластин с притупленной кромкой. Из работы [2] следует, что в случае острой передней кромки происходит «переворот» N-волны в пограничном слое плоской пластины.

Смысль «переворота» N-волны в пограничном слое плоской пластины с острой передней кромкой можно интерпретировать по аналогии с механизмом дифракции волн, в котором наблюдается потеря половины волны, или инвертирование N-волны в нашем

\* Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант № 22-19-00666). Работа выполнена на базе ЦКП «Механика» ИТПМ СО РАН.

случае. Можно предположить, что механизм дифракции (для волн Маха, т.е. акустических возмущений стационарных и нестационарных в общем случае) при боковом воздействии пары слабых ударных волн на острую переднюю кромку вероятен, тогда как появление продольных возмущений (вихрей, следов) на затупленных передних кромках имеет более сложный механизм, например, связанный с появлением микроотрывов в пограничном слое на линии растекания.

Численное моделирование процесса позволяет получать подробные результаты по воздействию слабых ударных волн в виде среднего течения и его дефекта, а при определенной постановке — и о влиянии воздействия N-волны на ламинарно-турбулентный переход [7 – 10]. Однако с помощью численного моделирования пока не удается получить информацию об особенностях пульсаций, сопровождающих N-волны, и их воздействии на пограничный слой.

Получить максимально полный набор информации о характеристиках возмущений, генерируемых N-волной, и об их влиянии на пограничный слой плоской пластины можно только посредством экспериментальных измерений с использованием нескольких датчиков термоанемометра, с последующей обработкой данных методами корреляционного анализа.

Цели настоящей работы были следующие:

— изучить возможность применения взаимно корреляционного анализа сигналов двух датчиков термоанемометра для определения источников пульсаций в сверхзвуковом потоке рабочей части аэродинамической трубы;

— исследовать взаимосвязь пульсаций набегающего потока и возмущений пограничного слоя модели плоской пластины с острой передней кромкой в случаях естественных пульсаций и при воздействии на переднюю кромку N-волны.

### Постановка эксперимента и методика обработки данных

Эксперимент проведен в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха  $M = 2$ , единичном числе Рейнольдса  $Re_1 = (8,0 \pm 0,1) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ . В качестве экспериментальной модели использовалась плоская стальная пластина, установленная в рабочей части под нулевым углом атаки. Ее размеры: толщина 10 мм, ширина 200 мм, длина 456 мм. Передняя кромка пластины имела скос в нижней части. Угол скоса составлял  $14^\circ 30'$ . Радиус притупления передней кромки равен  $0,018 \pm 0,002$  мм.

Постановка экспериментов схематично представлена на рис. 1. С боковой стенки рабочей части вводились возмущения в виде пары слабых ударных волн, источником которых являлась наклейка из ПВХ-ленты, которая наклеивалась на боковую стенку рабочей части трубы. Наклейка имела следующие размеры: ширина (вдоль потока)  $d = 2,5$  мм, высота  $h = 130$  мкм, длина около 150 мм.

Для измерения пульсаций течения применялись два ниточных датчика термоанемометра (см. рис. 1b). Датчик 11 был установлен в потоке под экспериментальной моделью, ниже по потоку за головной ударной волной, и в процессе экспериментов не перемещался. Второй датчик 10 закреплен на координатном механизме и мог перемещаться в потоке по трем координатам. Положение наклейки выбрано таким образом, что чувствительный элемент датчика 11 находился под воздействием слабой ударной волны 3.

Используемая система координат показана на рис. 1. Координата  $X$  направлена вдоль потока,  $Z$  — вдоль передней кромки,  $Y$  — перпендикулярно поверхности пластины. Направления осей образуют правую тройку векторов относительно направления потока. Начало отсчета координат совпадает с серединой передней кромки.

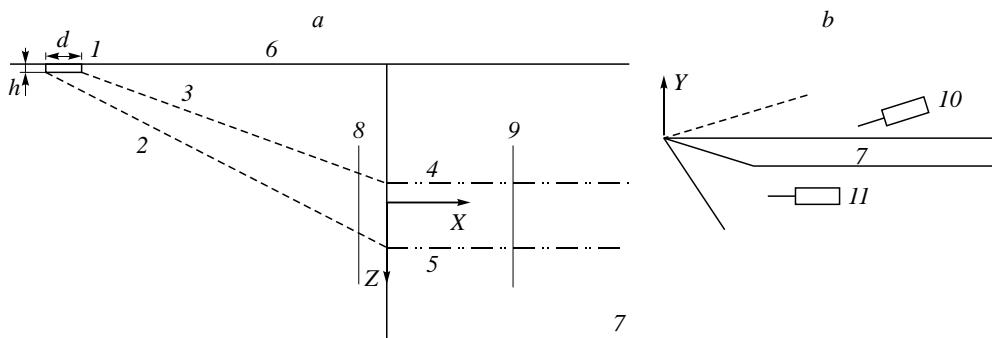


Рис. 1. Схема эксперимента.

Вид сверху на модель (a), вид сбоку (b); 1 — ПВХ-лента, 2, 3 — слабые ударные волны, 4, 5 — границы области возмущений, порожденных слабыми ударными волнами в пограничном слое, 6 — боковая стенка рабочей части, 7 — плоская пластина, 8 — сечение, измеренное перед пластиной, 9 — сечение, измеренное в пограничном слое, 10 — датчик термоанемометра, установленный на координатном механизме, 11 — датчик термоанемометра, закрепленный под пластиной.

Точность перемещения датчика термоанемометра 10 по продольной оси  $X$  составляла 0,05 мм, по оси  $Z$  — 0,1 мм, а по оси  $Y$  — 0,01 мм.

Использовалось два термоанемометра постоянного сопротивления серии СТА-2017 с соотношением плеч мостов 1:10 [11]. Сопротивление резисторов в измерительных плечах выбиралось равным 50 Ом. Датчики изготавливались из вольфрамовой проволоки диаметром 10 мкм и длиной  $1,5 \pm 0,1$  мм.

Постоянная часть сигнала термоанемометра, относящегося к датчику 10, измерялась мультиметром Agilent 34401A в режиме 5½ разрядов. Постоянная составляющая напряжения датчика 11 записывалась посредством внутреннего АЦП СТА-2017 в память персонального компьютера в составе стандартной измерительной системы Т-325. Пульсационная часть обоих сигналов синхронно записывалась измерительной системой Т-325 посредством АЦП L-Card E20-10, который имеет разрядность 14 бит. Частота дискретизации сигналов термоанемометров была 750 кГц, а длина реализаций  $N_r = 2^{11}$  точек. При каждом измерении системой АДТ-325 регистрировались параметры набегающего потока (температура и давление в форкамере, статическое давление в рабочей части) [12].

Средний массовый расход течения в области измерений определялся по среднему напряжению  $E$  на выходе термоанемометра из уравнения

$$E^2 = L + N(\rho U)^{0.5},$$

где  $L$ ,  $N$  — размерные калибровочные коэффициенты для конкретного датчика,  $\rho$  — плотность,  $U$  — скорость. При анализе экспериментальных данных рассматриваются распределения массового расхода, нормированные на течение в набегающем потоке при каждом измерении:

$$\frac{\rho U(Z)}{\rho_\infty U_\infty(Z)},$$

где  $\rho_\infty U_\infty(Z)$  — массовый расход в набегающем потоке, определяемый по параметрам течения в рабочей части.

Из пульсационного сигнала термоанемометров определялся среднеквадратичный уровень пульсации массового расхода, нормированный на среднее локальное течение:

$$\langle m' \rangle = \left\langle \frac{(\rho U)'}{\rho U} \right\rangle = \frac{\langle f_i \rangle}{Q \cdot E},$$

где  $(\rho U)'$  — пульсации массового расхода,  $\rho U$  — значение среднего массового расхода в области измерений,  $f_i$  — пульсационная часть сигналов ТПС,  $Q = 0,25$  — коэффициент чувствительности датчика к пульсациям массового расхода.

Для оценки взаимно корреляционных характеристик пульсаций набегающего потока и пограничного слоя (взаимно корреляционная функция, квадрат функции когерентности, взаимная фаза) применяется методика обработки сигналов термоанемометра, описанная ниже.

Нормированная взаимно корреляционная функция представляется в виде [13]

$$\begin{aligned} \rho_{f_1 f_2}(\tau) &= \frac{C_{f_1 f_2}(\tau)}{\sqrt{C_{f_1 f_1}(0)C_{f_2 f_2}(0)}}, \quad C_{f_1 f_2}(\tau) = E\left[\left(f_1(t) - \mu_{f_1}\right)\left(f_2(t + \tau) - \mu_{f_2}\right)\right] = \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T \left(f_1(t) - \mu_{f_1}\right)\left(f_2(t + \tau) - \mu_{f_2}\right) dt = R_{f_1 f_2}(\tau) - \mu_{f_1} \mu_{f_2}, \\ R_{f_1 f_2}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T f_1(t) f_2(t + \tau) dt, \end{aligned}$$

где  $f_1, f_2$  — пульсационные сигналы, индекс 1 соответствует датчику 10, индекс 2 соответствует датчику 11 (см. рис. 1b),  $R_{f_1 f_2}(\tau)$  — ковариационная функция,  $\tau$  — сдвиг сигналов по времени,  $\mu$  — математическое ожидание сигнала.

Если средние обоих сигналов равны нулю, то имеем

$$C_{f_1 f_2}(\tau) = R_{f_1 f_2}(\tau).$$

Тогда нормированная взаимно корреляционная функция записывается в виде

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{R_{f_1 f_2}(\tau)}{\sqrt{R_{f_1 f_1}(\tau)R_{f_2 f_2}(\tau)}}.$$

При этом для любого  $\tau$  имеем  $|\rho_{xy}(\tau)| \leq 1$ .

Расчет свертки двух сигналов для коэффициента корреляции с помощью прямого вычисления требует больших затрат времени. Для ускорения обработки данных используется перемножение спектральных плотностей сигналов ( $F_i(f)$ ), с последующим обратным преобразованием Фурье. Для этого применяется соотношение между спектральными плотностями и ковариационной функцией стационарного процесса. Это соотношение получается с помощью теоремы о свертке функций и свойства Фурье-преобразования об инверсии аргумента функции:

$$F_1(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) e^{-2\pi i f t} dt,$$

$$F_2(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(t) e^{-2\pi i f t} dt,$$

$$R_{f_1 f_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} F_1^*(f) F_2(f) e^{2\pi i f \tau} df,$$

где звездочка означает комплексное сопряжение.

Алгоритм получения нормированного коэффициента автокорреляции и взаимно корреляции с учетом использования быстрого преобразования Фурье можно кратко записать следующим образом:

$$|\rho_{f_1 f_2}(\tau, Z)| = \frac{FFT^{-1}\{F_1^*(f_k, Z) \cdot F_2(f_k, Z)\}}{\sqrt{FFT^{-1}\{F_1^*(f_k, Z) \cdot F_1(f_k, Z)\} \cdot FFT^{-1}\{F_2^*(f_k, Z) \cdot F_2(f_k, Z)\}}},$$

где  $FFT^{-1}$  — обратное быстрое преобразование Фурье,  $F_1(f_k, Z)$ ,  $F_2(f_k, Z)$  — Фурье-образы сигналов, полученные с помощью быстрого преобразования Фурье:

$$F_1(f_k, Z) = \sum_{n=0}^{N_r-1} f_{1n} e^{-i2\pi kn/N_r},$$

$$F_2(f_k, Z) = \sum_{n=0}^{N_r-1} f_{2n} e^{-i2\pi kn/N_r},$$

$$k = 0, \dots, N_r - 1.$$

Перед корреляционным анализом данные АЦП приводятся к нулевому среднему значению.

Амплитудные спектры сигналов получаются с помощью быстрого преобразования Фурье и сглаживанием посредством скользящего среднего с осреднением по 101 точке.

Оценка квадрата функции когерентности используется для получения взаимосвязи гармонических компонент двух сигналов, что позволяет определить диапазон частот, в котором сигналы связаны:

$$\hat{\gamma}_{f_1 f_2}^2(f, Z) = \frac{|\hat{S}_{f_1 f_2}(f, Z)|^2}{\hat{S}_{f_1 f_1}(f, Z) \hat{S}_{f_2 f_2}(f, Z)},$$

где  $f$  — частота. Оценки спектральных плотностей  $\hat{S}$  получены путем разбиения изначальной реализации на  $n_d = 128$  частей:

$$\hat{S}_{f_1 f_2}(f, Z) = \sum_{l=1}^{n_d} F_{1l}^*(f, Z) F_{2l}(f, Z),$$

$$\hat{S}_{f_1 f_1}(f, Z) = \sum_{l=1}^{n_d} F_{1l}^*(f, Z) F_{1l}(f, Z),$$

$$\hat{S}_{f_2 f_2}(f, Z) = \sum_{l=1}^{n_d} F_{2l}^*(f, Z) F_{2l}(f, Z).$$

Оценка взаимной фазы двух сигналов:

$$\hat{\theta}_{f_1 f_2}(f, Z) = \arctg \left( \frac{\operatorname{Re}(\hat{S}_{f_1 f_2}(f, Z))}{\operatorname{Im}(\hat{S}_{f_1 f_2}(f, Z))} \right).$$

Программа обработки экспериментальных данных реализована в среде MATLAB. Подробное описание алгоритма оценки корреляционных характеристик приведено в [14].

В настоящей работе представлены результаты измерений при фиксированном положении датчика 11 под моделью 7: датчиком 10 измерено распределение по трансверсальной координате  $Z$  вдоль передней кромки перед моделью при  $X = -10$  мм,  $Y = 0,5$  мм, а также в сечении пограничного слоя по трансверсальной координате  $Z$  вдоль передней кромки перед моделью при  $X = 60$  мм,  $Y = 0,5$  мм (см. рис. 1a).

### Результаты измерений в набегающем потоке

На рис. 2a, 2b представлены распределения среднего массового расхода и уровня пульсаций потока в поперечном к потоку направлении, на рис. 2c, 2d — амплитудные спектры пульсаций, измеренные верхним датчиком 10 перед передней кромкой пластины для случаев потока с возмущением (рис. 2a, 2c) от двумерной наклейки на стенке рабочей части и невозмущенного (без источника на стенке рабочей части) потока (рис. 2b, 2d).

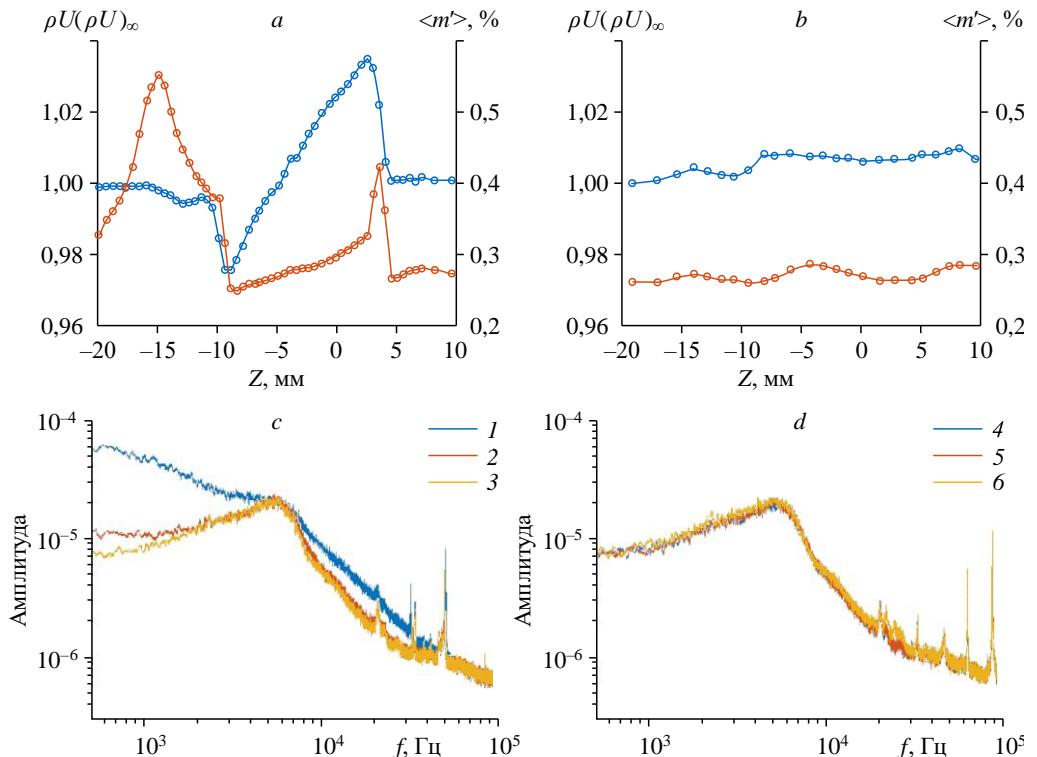


Рис. 2. Распределения в измеренном сечении по  $Z$ ,  $X = -10$  мм и  $Y = 0,5$  мм среднего массового расхода и пульсаций массового расхода: *a* — в течении со слабыми ударными волнами, *b* — в невозмущенном потоке; амплитудные спектры пульсаций: *c* — в течении со слабыми ударными волнами, *d* — в невозмущенном потоке.

$Z = -15,5$  (1),  $-0,3$  (2),  $8,1$  (3),  $-15,4$  (4),  $0,1$  (5),  $8,2$  (6) мм.

При наличии источника возмущений в набегающем потоке наблюдается искажение среднего течения (см. рис. 2a) в виде N-волны с амплитудой по массовому расходу peak-to-peak приблизительно 6 % с фронтами (слабыми ударными волнами 2 и 3 на рис. 1a) при  $Z \approx -10$  и 4 мм. При этом наблюдается значительное повышение уровня пульсаций массового расхода (см. рис. 2a). Регистрируется протяженная зона повышенного уровня нестационарных возмущений в области  $Z = -20 \div -10$  мм, что соответствует области ниже по потоку от N-волны. Именно эта область с повышенным уровнем пульсаций потока падает на нижний неподвижный датчик 11 (см. рис. 1b). Также наблюдается незначительное повышение уровня пульсаций потока в области между фронтами N-волны и при прохождении датчиком слабой ударной волны 2 (см. рис. 1a). Отметим, что близкие экспериментальные результаты были получены, например, в работе [2], в которой использовался аналогичный источник возмущений.

Без источника возмущений на стенке рабочей части неоднородность по среднему массовому расходу набегающего потока в этих экспериментах не превышает 1 %, а уровень пульсаций в области измерений практически не изменяется (см. рис. 2b).

Амплитудные спектры пульсаций, представленные на рис. 2c, 2d, показывают, что возмущения в свободном потоке и в области между фронтами N-волны обладают близким амплитудно-частотным составом. В области ниже по потоку от фронта волны 3 от уступа источника 1 (см. рис. 1) наблюдается повышение уровня пульсаций практически во всем диапазоне частот. Возможно, это связано с отрывом течения за уступом источника слабых ударных волн в турбулентном пограничном слое на стенке рабочей части трубы.

На рис. 3 представлены результаты оценки автокорреляционных и взаимно корреляционной функций. Автокорреляции для датчика 10 для случаев потока с источником возмущений на стенке рабочей части и без него представлены на рис. 3a, 3b соответственно. Автокорреляции для нижнего неподвижного датчика 11 для удобства представлены в зависимости от положения датчика 10 на рис. 3c, 3d для случаев возмущенного и невозмущенного датчика соответственно. Оценки взаимно-корреляционных функций пульсационных сигналов датчиков 10 и 11 представлены на рис. 3e, 3f.

Для сигнала с датчика 10 в набегающем потоке видно, что при отсутствии источника возмущений на стенке рабочей части (см. рис. 3b) автокорреляционная функция слабо меняется в зависимости от координаты  $Z$ . Малые изменения могут быть связаны с особенностями поля пульсаций набегающего потока в этих экспериментах и малыми шероховатостями на стенке рабочей части трубы, которые могли образоваться после демонтажа источника возмущений. При наличии источника возмущений на стенке рабочей части наблюдается значительная зависимость автокорреляционной функции от положения датчика (см. рис. 3a). Наибольшее отклонение от случая невозмущенного потока наблюдается в области  $Z = -20 \div -10$  мм, в которой повышен уровень пульсаций (см. рис. 2a).

Для сигналов с датчика 11 видно, что автокорреляционные функции слабо зависят от положения датчика 10. Это показывает, что во время измерений пульсации потока в области датчика 11 меняются слабо, а также что отсутствует влияние датчика 10 на течение в области датчика 11. В случае возмущенного набегающего потока (см. рис. 3c) автокорреляционная функция датчика 11 близка к результатам для датчика 10 в области  $Z = -20 \div -10$  мм. Именно эти повышенные пульсации попадают на датчик 11. Для случая невозмущенного набегающего потока (см. рис. 3d) автокорреляция сигнала также слабо зависит от положения датчика 10. Отличия автокорреляционных функций датчика 10 (см. рис. 3a) и датчика 11 (см. рис. 3d) в невозмущенном потоке может быть объяснено следующими факторами. Во-первых, датчик 11 находится за ударной волной от модели,

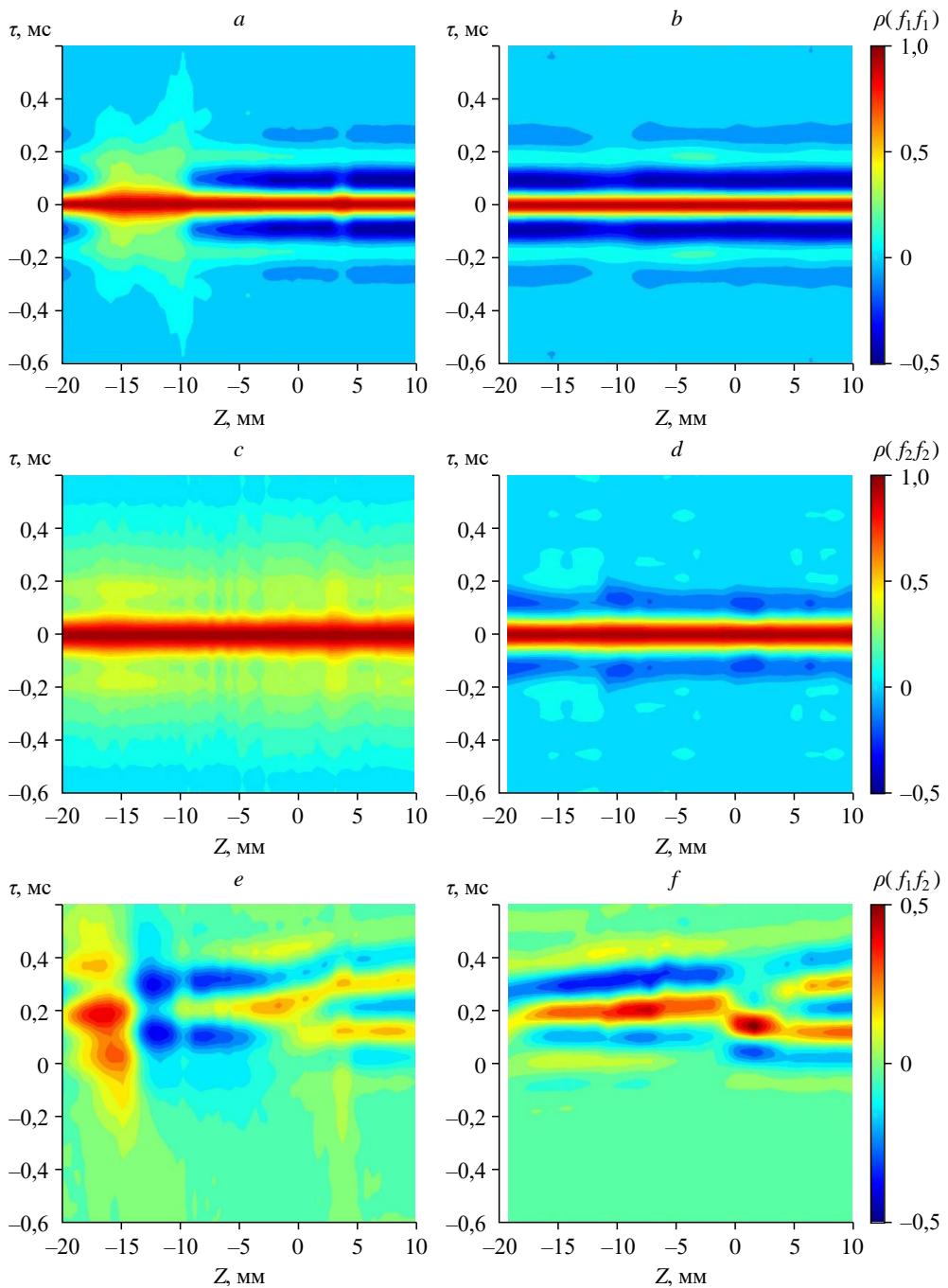


Рис. 3. Результаты корреляционного анализа для сечения по  $Z$ ,  $X = -10$  мм и  $Y = 0,5$  мм.

Автокорреляционная функция сигнала датчика 10: *a* — в течении со слабыми ударными волнами, *b* — в невозмущенном внешнем потоке; автокорреляционная функция сигнала датчика 11: *c* — в течении со слабыми ударными волнами, *d* — в невозмущенном внешнем потоке; взаимнокорреляционная функция сигналов с датчиков 10 и 11: *e* — в течении со слабыми ударными волнами, *f* — в невозмущенном потоке.

что может приводить к изменению пульсаций потока. Во-вторых, датчик 11 расположен под пластиной и экранирован последней от возмущений, источником которых является пограничный слой верхней сопловой вставки.

Взаимно корреляционный анализ (см. рис. 3e, 3f) сигналов с датчиков дает сложный результат. Прежде всего можно заключить, что существует значительная взаимосвязь между пульсационными сигналами с датчиков 10 и 11, достигающая значений 0,4 в случае возмущенного течения и 0,5 в невозмущенном потоке. Положительное время  $\tau$  в обоих случаях свидетельствует, что, как и ожидалось, на датчик 10 возмущения приходят раньше относительно датчика 11.

При измерениях в невозмущенном потоке (см. рис. 3f) во всей области измерения взаимно корреляционная функция при положительных временных сдвигах  $\tau$  имеет периодический вид по времени. При этом наблюдается изменение периода по  $\tau$  в зависимости от положения датчика, характерный период составляет приблизительно  $0,18 \div 0,22$  мс. По этим данным можно оценить область частот  $4 \div 6$  кГц, в которой наблюдается наибольшая взаимосвязь сигналов. Некоторая перестройка характера взаимно корреляционной функции наблюдается при прохождении датчика 10 в области  $Z = 0$  (что соответствует центральной линии модели и положению датчика 11). Возможно, что в области отрицательных значений координаты  $Z$  наибольший вклад в сигнал дают пульсации, порожденные от левой (относительно потока) стенки рабочей части трубы, а в области положительных значений  $Z$  — от правой. Однако требуются дополнительные измерения для доказательства этого предположения.

В случае возмущенного набегающего потока (см. рис. 3e) в целом наблюдается аналогичная случаю невозмущенного потока картина, за исключением области  $Z = -20 \div -10$  мм, где датчик 10 проходит через зону повышенных пульсаций от источника слабых ударных волн на стенке рабочей части. При  $Z = -20 \div -15$  мм фиксируются два положительных пика взаимно корреляционной функции, при  $Z = -15 \div -10$  мм — два отрицательных. Изменение знака взаимной корреляции при прохождении точки  $Z = -15$  мм, по-видимому, связано с нахождением в этой области максимума пульсаций (см. рис. 2c).

Информацию о частотном диапазоне, в котором сигналы взаимосвязаны, дают распределения квадрата функции когерентности и взаимной фазы, представленные на рис. 4. На рис. 4 по горизонтальной оси отложена координата  $Z$ , по вертикальной — частота в логарифмическом масштабе. Случаю возмущенного двумерной наклейкой на стенке рабочей части потока соответствуют рис. 4a, 4c, случаю невозмущенного набегающего потока — рис. 4b, 4d.

В невозмущенном потоке в распределении квадрата функции когерентности (см. рис. 4b) можно выделить три зоны с выраженной взаимосвязью в сигналах от датчиков 10 и 11:  $Z = -15 \div -5$  и  $5 \div 10$  мм в области частот  $4 \div 6$  кГц;  $Z = -5 \div 5$  мм в области частот  $2 \div 5$  кГц. Так же как и на рис. 3, наблюдается несимметричность относительно  $Z = 0$ .

В распределении взаимной фазы (см. рис. 4c) видно, что в случае невозмущенного набегающего потока фаза определяется в области частот  $2 \div 20$  кГц, несмотря на то, что значение квадрата функции когерентности в области частот выше 6 кГц существенно уменьшается по сравнению с диапазоном  $4 \div 6$  кГц. Распределение взаимной фазы, как и квадрата функции когерентности, не симметрично относительно  $Z = 0$ . Для фиксированной частоты наблюдается нарастание фазы при увеличении координаты  $Z$  положения датчика 10.

Взаимная фаза сигналов, так же как и квадрат функции когерентности, не определяется при частотах выше 20 кГц. Это связано с тем, что при высоких частотах амплитуда пульсаций массового расхода потока мала, и в сигналах термоанемометров на высоких

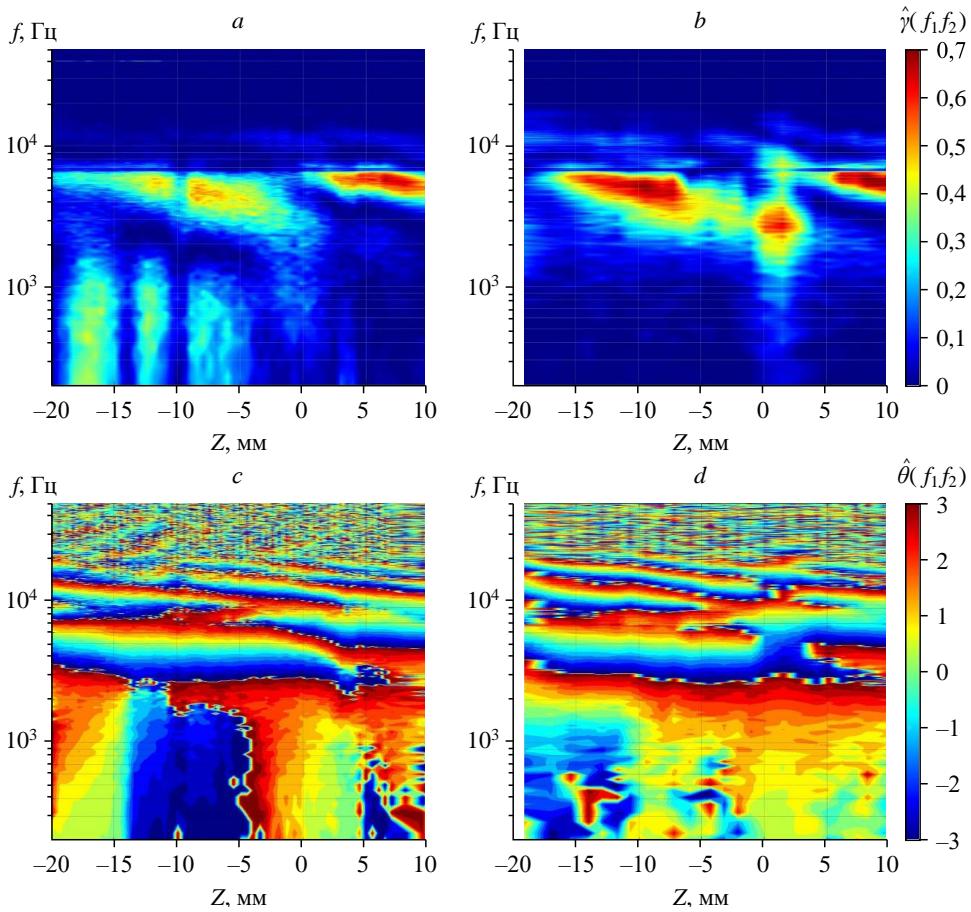


Рис. 4. Пространственно-частотные распределения квадрата функции когерентности и взаимной фазы в сечении по  $Z$ ,  $X = -10$  мм и  $Y = 0,5$  мм.

*a, c* — в течении со слабыми ударными волнами; *b, d* — в невозмущенном потоке.

частотах преобладает шум. Таким образом, полученные результаты не продемонстрировали, что нет взаимосвязи пульсаций потока при высоких частотах.

В случае, когда в потоке присутствуют возмущения от источника на стенке рабочей части, в распределении квадрата функции когерентности (см. рис. 4a) можно выделить две зоны, аналогичные случаю невозмущенного потока:  $Z = -15 \div -5$  мм в области частот  $4 \div 6$  кГц, однако в этой области взаимосвязь ниже по сравнению с невозмущенным случаем;  $Z = 5 \div 10$  мм в области частот  $4 \div 6$  кГц, взаимосвязь сигналов подобна случаю течения без источника. В области  $Z = -5 \div 5$  мм для частот  $2 \div 5$  кГц, где наблюдалась взаимосвязь пульсаций невозмущенного потока, квадрат функции когерентности значительно уменьшается при наличии N-волн от неровности на стенке рабочей части. Дополнительно, по сравнению с невозмущенным случаем, наблюдается усиление взаимосвязи сигналов в низкочастотной области (ниже 2 кГц) при  $Z = -20 \div 10$  мм, что определяется повышенным уровнем пульсаций, которые генерируются источником на стенке рабочей части (см. рис. 2a).

В распределении взаимной фазы для случая возмущенного потока (см. рис. 4c) видно, что в высокочастотной (от 4 до 20 кГц) области наблюдается качественно близкая случаю невозмущенного потока картина (рис. 4d). Однако на низких частотах определяется

взаимная фаза при наличии возмущений от источника на стенке рабочей части. В области  $Z = -20 \div -10$  мм для частот до 2 кГц отмечается снижение значения взаимной фазы при увеличении  $Z$ . При прохождении датчиком 10 максимального уровня возмущений от источника наблюдается скачок взаимной фазы. В области  $Z = -10 \div 3$  мм, когда датчик находится внутри N-волны, взаимная фаза также снижается при увеличении  $Z$ . Заметим, что при высоких частотах (от 4 до 20 кГц), где, по-видимому, наблюдается взаимосвязь «естественных» пульсаций потока, при увеличении значения координаты  $Z$  значение взаимной фазы растет. Объяснением может быть то, что «естественные» пульсации потока вызваны источниками, которые располагаются на правой (относительно направления потока) стенке рабочей части трубы.

Далее рассмотрим корреляционные характеристики возмущений, полученные в сечении пограничного слоя по  $Z$  при  $X = 60$  мм,  $Y = 0,5$  мм. На рис. 5 представлены распределения в поперечном к потоку направлении среднего массового расхода и уровня пульсаций потока, измеренные верхним датчиком 10, в пограничном слое пластины для случаев потока с возмущением (см. рис. 5a) от двумерной наклейки на стенке рабочей части и невозмущенного (без источника на стенке рабочей части) потока (см. рис. 5b).

При наличии источника возмущений в набегающем потоке наблюдается искажение среднего течения (см. рис. 5a) в виде «перевернутой» N-волны с амплитудой по массовому расходу peak-to-peak приблизительно 15 % в области  $Z = -7 \div 10$  мм. Регистрируется протяженная зона повышенного уровня нестационарных возмущений в области  $Z = -15 \div -5$  мм, что аналогично результатам измерений перед пластиной (см. рис. 2a).

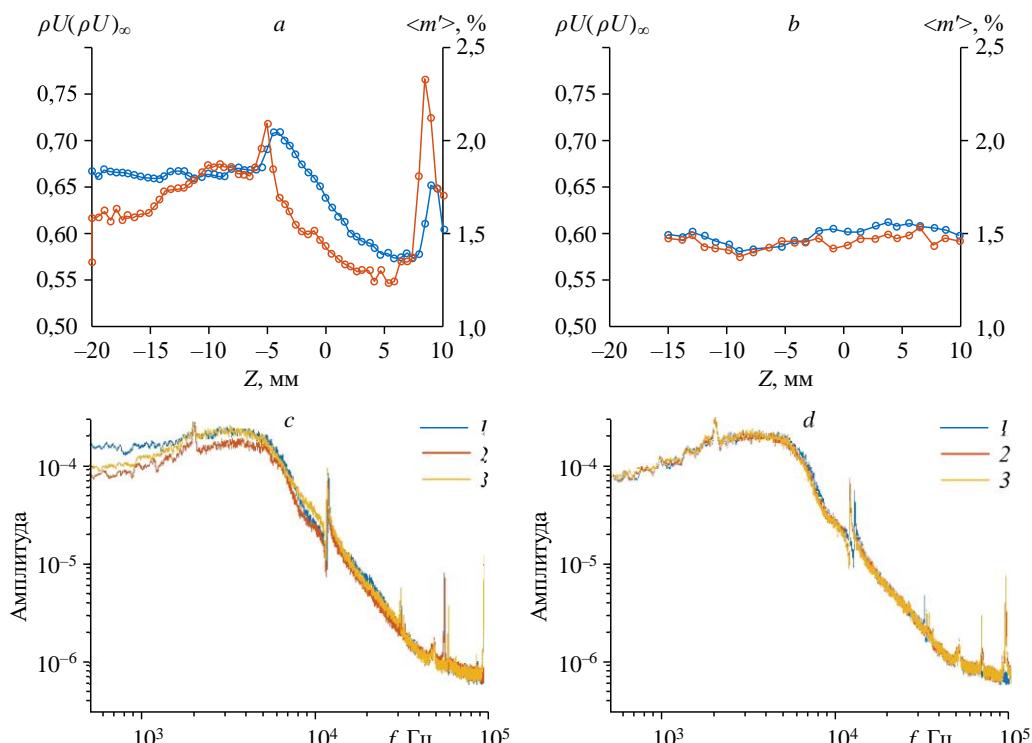


Рис. 5. Распределения в измеренном сечении пограничного слоя по  $Z$  ( $X = 60$  мм и  $Y = 0,5$  мм), среднего массового расхода и пульсаций массового расхода.

a — в течении со слабыми ударными волнами, b — в невозмущенном потоке; амплитудные спектры пульсаций: c — в течении со слабыми ударными волнами,

d — в невозмущенном потоке;

$Z = -5,1$  (1),  $-0,1$  (2),  $10$  (3),  $-5,3$  (4),  $0,3$  (5),  $10$  (6) мм.

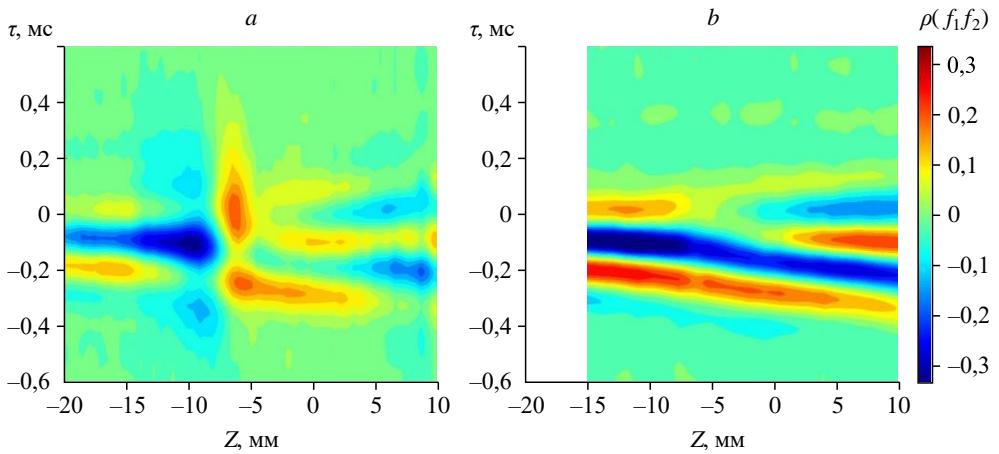


Рис. 6. Результаты корреляционного анализа для сечения пограничного слоя по  $Z$  при  $X = 60$  мм.

Взаимно корреляционная функция сигналов с датчиков 10 и 11: течение со слабыми ударными волнами (a), невозмущенный поток (b).

В случае отсутствия источника слабых ударных волн пульсации массового расхода в пограничном слое не превышают 1,5 %.

Спектральный состав возмущений для случаев возмущенного и невозмущенного потоков представлены на рис. 5c, 5d. В случае невозмущенного потока на рис. 5d спектральный состав возмущений в измеренном сечении одинаков. В случае течения с источником слабых ударных волн на рис. 5c в области ниже по потоку от фронта волны 3 от уступа источника 1 ( $Z = -5,1$  мм) наблюдается повышение уровня пульсаций в диапазоне низких частот. Аналогично результатам измерений в свободном потоке спектральная плотность возмущений в области между фронтами N-волны ( $Z = -0,1$  мм) и в области невозмущенного пограничного слоя ( $Z = 10$  мм) совпадают.

Ввиду того, что автокорреляционные функции сигналов имеют вид, аналогичный автокорреляционным функциям, изображенным на рис. 3a–3d, для пограничного слоя они не представлены. Результат оценки взаимно корреляционных функций пульсационных сигналов с датчиков 10 и 11 приведены на рис. 6.

Отрицательное время  $\tau$ , при котором достигается максимальное значение взаимно корреляционной функции, объясняется тем, что датчик под пластиною находится впереди по потоку относительно датчика в пограничном слое. Картины взаимной корреляции также имеют периодическую структуру по  $\tau$  (см. рис. 6).

В случае возмущенного потока (см. рис. 6a) пики взаимосвязи находятся при  $Z = -10$  и  $-6$  мм, что соответствует области максимальных возмущений в пограничном слое (см. рис. 5a). Значения коэффициента корреляции достигают 0,3.

В случае невозмущенного потока (см. рис. 6b) наблюдается несимметричность картины корреляции относительно  $Z = 0$ . Что аналогично поведению взаимно корреляционной функции для невозмущенного потока перед пластиною (см. рис. 3f).

Анализ квадрата функции когерентности показывает, что в случае возмущенного потока (рис. 7a) частотный диапазон, в котором сигналы взаимосвязаны, аналогичен таковому на рис. 4c и составляет  $2 \div 20$  кГц, а в области  $Z = -1 \div 10$  мм имеется взаимосвязь на низких частотах (ниже 2 кГц).

В случае невозмущенного потока взаимосвязь пульсаций пограничного слоя и возмущений набегающего потока находится в диапазоне  $2 \div 20$  кГц (см. рис. 7b). В обоих случаях взаимосвязь ниже, чем для пульсаций свободного потока, и значения функции взаимной корреляции не превышают 0,4.

Взаимные фазы возмущений для пульсаций пограничного слоя и возмущений набегающего потока представлены на рис. 7c, 7d. Стоит отметить, что в случае невозмущенного потока характер распределения взаимной фазы имеет паттерн, сходный с представленным на рис. 4c. В невозмущенном потоке взаимные фазы также имеют сходство со случаем, представленным на рис. 4d.

Таким образом, анализ распределений квадрата функций когерентности возмущений свободного потока, измеренных датчиками вне пограничного слоя, и аналогичных характеристик для пульсаций свободного потока и возмущений пограничного слоя показывает, что пограничный слой острой пластины восприимчив к высокочастотным ( $2 \div 20$  кГц) пульсациям набегающего потока, а также к низкочастотным ( $0,2 \div 2$  кГц) пульсациям от источника слабых ударных волн.

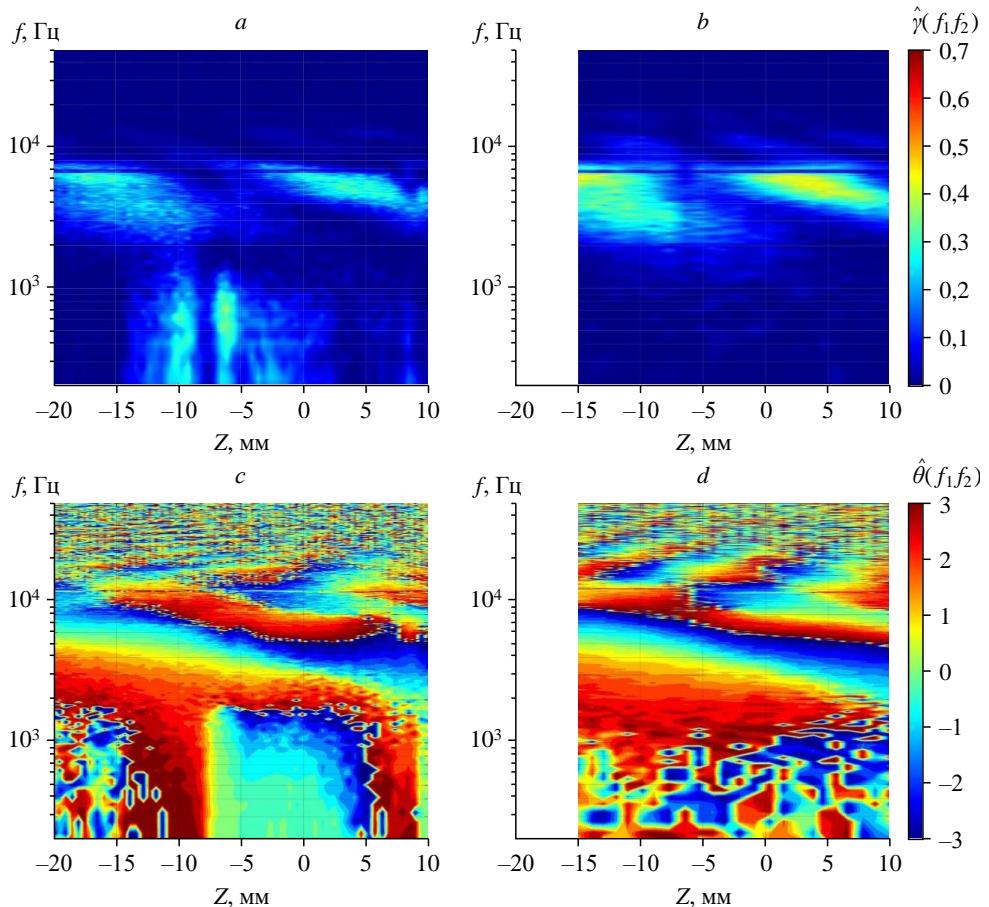


Рис. 7. Распределения в сечении пограничного слоя по  $Z$  при  $X = 60$  мм:  
квадрата функции когерентности течения

со слабыми ударными волнами (a) и невозмущенного потока (b);  
взаимной фазы по частотам со слабыми ударными волнами (c) и невозмущенного потока (d).

## Заключение

С использованием модели плоской пластины с острой передней кромкой в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 выполнены эксперименты по оценке взаимосвязи пульсаций потока перед моделью и в пограничном слое с пульсациями свободного потока под моделью, как в случае естественных пульсаций, так и при наличии N-волны. В экспериментах использовались два датчика и термоанемометры постоянного сопротивления. Один датчик был закреплен под моделью снизу, а другой закреплялся на штанге координатника и мог перемещаться над моделью.

При анализе данных верхнего датчика в свободном потоке неоднородности среднегодичного течения и поля пульсаций не обнаруживаются. Взаимно корреляционный анализ сигналов двух датчиков показал несимметричность поля пульсаций относительно центра рабочей части аэродинамической трубы, что указывает на неравномерный вклад источников возмущений на стенках рабочей части. Оценка квадрата функции когерентности возмущений пограничного слоя плоской пластины с острой передней кромкой и пульсаций набегающего потока показывает, что пограничный слой слабо восприимчив к низкочастотным естественным пульсациям набегающего потока (менее 2 кГц).

При введении в свободный поток пары слабых ударных волн обнаруживается повышенная восприимчивость к низкочастотным возмущениям из окрестности N-волны. Из анализа распределений взаимной фазы сигналов следует, что возмущения в пограничном слое согласованы с возмущениями набегающего потока по фазе, как в случае естественных возмущений, так и в случае воздействия N-волны на переднюю кромку модели плоской пластины. Характер распределения взаимной фазы в свободном потоке и пограничном слое при их «выравнивании» по максимуму возмущений в окрестности N-волны показывает, что в области низких частот ( $0,2 \div 1,5$  кГц) имеется сдвиг взаимной фазы приблизительно на  $180^\circ$ . Это аналогично процессу дифракции волн.

## Список литературы

1. Kocharin V.L., Semionov N.V., Kosinov A.D., Yermolaev Yu.G., Yatskikh A.A. Experimental study of effect of a couple of weak shock waves on boundary layer of the blunt flat plate // Proc. of the 19th Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR-2018): AIP Conf. Proc. Melville, NY: Amer. Inst. of Phys., 2018. Vol. 2027. P. 040026-1–040026-5.
2. Косинов А.Д., Семенов Н.В., Яцких А.А., Кочарин В.Л., Шмакова А.В. Влияние радиуса притупления передней кромки пластины на отклик пограничного слоя при воздействии N-волны при числе Маха  $M = 2$  // Теплофизика и аэромеханика. 2023, Т. 30, № 2. С. 239–249.
3. Khotyanovsky D., Kudryavtsev A., Kosinov A. Numerical study of the interaction of the N-wave with the plate leading edge in the supersonic stream // Proc. of the XXV Conf. High-Energy Processes in Condensed Matter: AIP Conf. Proc. Novosibirsk, 2017. Vol. 1893. P. 030051-1–030051-6.
4. Егоров И.В., Динь К.Х., Нгуен Н.К., Пальчековская Н.В. Численное моделирование взаимодействия волны Маха и сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине с острой передней кромкой // Учен. зап. ЦАГИ. 2021. Т. ЛII, № 3. С. 18–28.
5. 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 // Докл. РАН. Физика, техн. науки. 2022. Т. 504, № 1. С. 36–40.
6. 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.
7. Ваганов А.В., Ермолаев Ю.Г., Колосов Г.Л., Косинов А.Д., Панина А.В., Семенов Н.В. О воздействии падающей волны Маха на поле пульсаций в пограничном слое при обтекании плоского дельта-крыла // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2014. Т. 9, № 1. С. 29–38.
8. Динь К.Х., Егоров И.В., Федоров А.В. Влияние волн Маха на ламинарно-турбулентный переход при сверхзвуковом обтекании плоской пластины // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2018. № 5. С. 113–124.

9. **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, No. 5. P. 690–701.
10. **Din Q.H., Egorov I.V., Fedorov A.V.** Interaction of Mach waves and boundary layer at a supersonic flow over a plate with a sharp leading edge // *TsAGI Sci. J.* 2017. Vol. 48, No. 4. P. 317–329.
11. **Kosinov A.D., Yermolaev Y.G., Semionov N.V., Kolosov G.L., Panina A.V.** To the analysis of the natural pulsation development during laminar-turbulent transition in supersonic boundary layer // *Proc. of the XXV Conf. on High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM)*: AIP Conf. Proc. Melville, NY: Amer. Inst. of Phys., 2017. Vol. 1893. P. 030073-1–030073-5.
12. **Kosinov A.D., Semionov N.V., Yermolaev Yu.G.** Disturbances in test section of T-325 supersonic wind tunnel. Novosibirsk, 1999. 24 p. (Preprint / Russian Academy of Sci., Siberian Branch. Inst. Theoret. and Appl. Mech. No. 6–99).
13. **Бендат Дж., Пирсол А.** Применения корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312 с.
15. **Афанасьев Л.В., Косинов А.Д., Яцких А.А., Шипуль С.А., Семенов Н.В.** О методике оценки взаимосвязи возмущений с помощью цифровой обработки сигналов применительно к измерениям в сверхзвуковых течениях // Сиб. физ. журн. 2022. Т. 17, № 4. С. 58–71.

*Статья поступила в редакцию 15 октября 2023 г.,  
после доработки — 18 ноября 2023 г.,  
принята к публикации 21 ноября 2023 г.*