



УДК 53.087.4

М.П. Голубев, А.А. Павлов

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

РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДХОДА ФАЗОВОЙ (КОРРЕЛЯЦИОННОЙ) СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА НА ПОВЕРХНОСТИ ОБТЕКАЕМОЙ МОДЕЛИ

В работе обсуждаются оптические методы регистрации параметров потока на поверхности обтекаемой модели, построенные на подходе фазовой спекл-интерферометрии. В их основе лежит связь изменения оптического пути в слое прозрачного вещества (датчике) с исследуемым параметром. Рассмотрены панорамные методики измерения/визуализации полей давления и тепловых потоков.

СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ, ВИЗУАЛИЗАЦИЯ, ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ,
ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ

1. ВВЕДЕНИЕ. Для регистрации параметров на поверхности обтекаемой модели традиционно можно использовать точечные датчики, размещаемые как на самой поверхности, так и в непосредственной ее близости. При этом в первом случае возникает необходимость довольно сложного препарирования модели, а во втором – необходимость проводить расчеты искомого параметра, используя численные методы. Альтернативой могут служить оптические методы регистрации, обладающие неоспоримыми достоинствами: бесконтактностью и панорамностью, позволяющие с относительной простотой и требуемой точностью получить необходимые данные.

В последнее время развиваются и широко используются различные оптические методы регистрации полей давления, тепловых потоков, температуры и давления. Все они обладают рядом преимуществ и недостатков, поэтому задача расширения спектра методов доступных для регистрации того или иного параметра является важной не только с точки зрения методологии, но и с точки зрения аэрофизического эксперимента.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Обоснование метода. Методы корреляционной спекл-интерферометрии, в которых описание изменения спекл-структуры невозможно без использования понятия интерференции, также находят применение

ние при исследовании течений. Пусть в плоскости (x, y) интерферируют две волны с комплексными амплитудами $A_{1, 2}(x, y) = a_{1, 2}(x, y)\exp[i\psi_{1, 2}(x, y)]$. Интенсивность при этом описывается обычным интерференционным соотношением $I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\Delta\psi)$, где $I_j = a_j a_j$, $\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1$. Пусть в ходе эксперимента пространственное распределение амплитуд a_1 и a_2 остается постоянным, а разность фаз между волнами A_1 и A_2 меняется на $\Delta\varphi = \Delta\varphi(\xi(t))$, где ξ – некоторый параметр, характеризующий исследуемый процесс. Простейшие математические операции с изображениями, полученными в два разных момента времени, позволяют выделить искомое изменение разности фаз.

Использование численной обработки изображений позволяет существенно улучшить качество итоговых интерферограмм. При этом следует отметить, что термин «корреляционная спекл-интерферометрия», на наш взгляд, является не вполне удачным, поскольку для исходных волн A_1 и A_2 нарушение амплитудной корреляции должно быть минимальным, иначе метод не будет работать. Должна меняться только разность фаз интерферирующих волн. Кроме того, в математическом описании любого алгоритма обработки не присутствуют какие-либо корреляционные функции. По этой причине в дальнейшем эти методы мы будем называть методами фазовой спекл-интерферометрии.

Данный подход может быть реализован, если рассматривать изменение толщины прозрачного слоя 1 под действием исследуемого параметра ξ (рис. 1). При этом волны A_1 и A_2 получаются рассеянием/отражением зондирующей волны от поверхностей 2. Как упоминалось выше, изменения толщины слоя не должны приводить к изменению амплитуд волн. Изменение разности фаз может быть выражено как

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{2\pi \cdot n}{\lambda} \cdot \Delta h(\xi(x, y)).$$

2.2. Метод регистрации полей давления.

Рассмотрим слой прозрачного упругого вещества, изменяющего толщину под действием давления. Величина Δh при изменении давления на Δp может быть выражена из относительного изменения толщины слоя [1]:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}{E(1 - \sigma)} \Delta p,$$

где E – модуль Юнга, σ – коэффициент Пуассона, Δp – изменение давления, h – толщина слоя. Таким образом, изменение давления может быть линейно

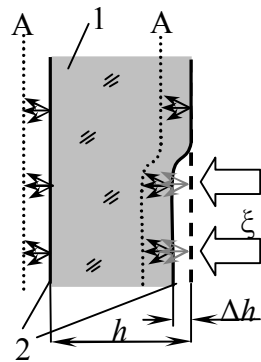


Рис. 1. Схема, поясняющая принцип метода

связано с изменением разности фаз. Чувствительность метода зависит от E и h и может достигать величин 0,1 мм вод. ст.

На рис. 2. представлены результаты визуализации поля давления, создаваемого дозвуковой струей воздуха, распространяющейся вдоль поверхности слоя (датчика). На рис. 3 представлена визуализация поля давления на стенке канала ударной трубы при распространении по нему скачка уплотнения.

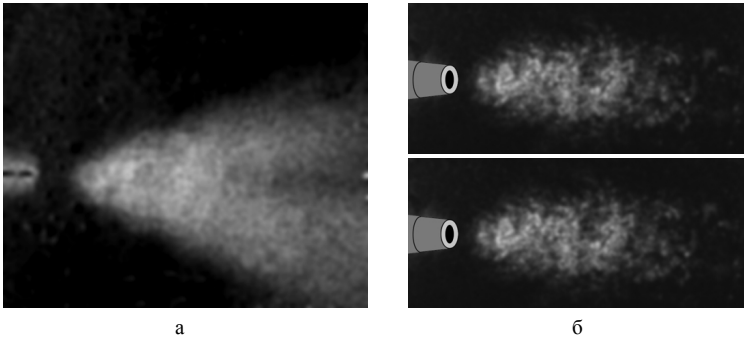


Рис. 2. Поле давления от струи, распространяющейся вдоль поверхности, визуализированное различными типами датчиков. Максимальное статическое давление: а – 5 см вод. ст.; б – 1 см вод. ст.

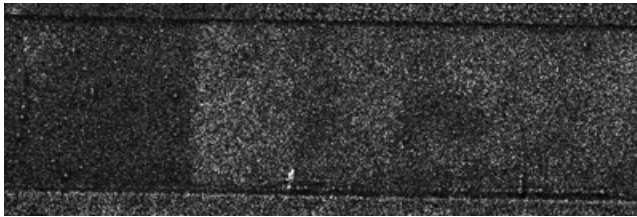


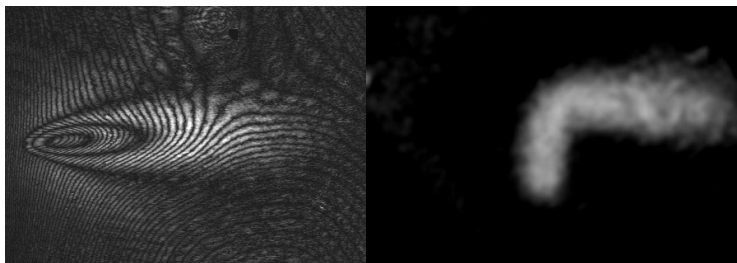
Рис. 3. Поле давлений на стенке ударной трубы, создаваемое потоком за скачком уплотнения

2.3. Метод регистрации полей тепловых потоков. Другим примером реализации подхода фазовой спекл-интерферометрии может служить метод регистрации полей тепловых потоков, основанный на изменении оптического пути в слое прозрачного вещества под действием тепла. При этом изменение оптической толщины датчика возникает из-за изменения как толщины слоя, так и изменения показателя преломления среды. Ранее было показано [2], что тепловой поток Q линейно связан с изменением разности фаз соотношением:

$$Q(x, y) = k \frac{\Delta\varphi(x, y)}{2\pi\Delta t},$$

где k – постоянный коэффициент, зависящий от свойств используемого для изготовления датчика вещества.

Рис. 4, а демонстрирует визуализацию тепловых потоков от струи нагретого газа, распространяющейся вдоль поверхности датчика (слева направо). На рис. 4, б представлена визуализация радиационных тепловых потоков создаваемых жалом паяльника, нагретого до температуры 250°C.



а б
Рис. 4. Визуализация тепловых потоков

3. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.7. Теория упругости. М.:Наука, 1987. 248 с.
2. Павлов А.А., Голубев М.П., Павлов Ал.А. Оптический метод регистрации тепловых потоков / Препринт № 3-2002, ИТПМ СО РАН, Новосибирск, 2002.

M.P. Golubev, A.A. Pavlov

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk, Russia

REALIZATION OF PHASE SPECKLE-INTERFEROMETRY FOR REGISTRATION OF FLOW CHARACTERISTICS ON THE SURFACE OF AERODYNAMIC BODY

Optical methods of registration of flow characteristics on the surface of aerodynamic body built upon phase speckle-interferometry are described. They are based on the relation of optical path within the glass layer (sensor) with observable parameter. Panoramic techniques of pressure field and heat-flux field measurements/visualization are considered.

SPECKLE-INTERFEROMETRY, VISUALIZATION, PRESSURE FIELD, HEAT-FLUX FIELD