

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ ТЕНЕВЫМИ И ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

© 2007 С. И. Иншаков

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ),
г. Жуковский

Представлены результаты использования классических рефрактометрических методов исследования прозрачных потоков газа: прямотеневого, теневого и интерферометрического в современных условиях в трубном и баллистическом экспериментах. Даны границы применимости каждого метода.

О сути визуализации. Тело, помещенное в поток воздуха, будет оказывать на него воздействие, в свою очередь возмущенный поток будет по III закону Ньютона оказывать такое же воздействие на тело. Отсюда открываются два направления исследований.

Во-первых, можно изучать воздействие потока на модель – например, измерять распределенные силы нормального давления, действующие на тело, или регистрировать силы и моменты, действующие на всю модель. Во-вторых, можно изучать возмущенный поток, а именно – характер, структуру и координаты этих возмущений, и по ним восстанавливать силовое воздействие на модель. Этот вид испытаний называется визуализацией обтекания модели. Для полного исследования характеристик летательного аппарата необходима как регистрация нагрузок на модель, так и визуализация его обтекания, в идеале эти исследования должны проводиться одновременно.

Испытания в аэродинамической трубе без визуализации – это буквально исследование с закрытыми глазами.

Возмущения в потоке можно обнаружить по многим признакам. Принцип действия теневого и интерференционных приборов основывается на использовании одного и того же физического явления – реакции светового пучка на изменение показателя преломления среды. Показатель преломления потока (n) однозначно связан с его плотностью формулой Гладстона – Дейла [1]: $k = (n-1)/r$, где k – постоянный коэффициент для данного газа и для данной длины волны. Так, для воздуха при 0°C и $P_a = 10^5$ Па

$k = 0,22575$ для желтой D-линии натрия ($\lambda = 0,589$ мкм), размерность плотности – г/см³. Можно показать, что измеряемые интерферометром величины является функциями показателя преломления среды $n(x, y, z)$, получаемые с помощью теневого прибора – функциями градиентов показателя преломления

$\left(\frac{\partial n}{\partial x}; \frac{\partial n}{\partial y}; \frac{\partial n}{\partial z} \right)$, а получаемые с помощью прямотеневого установок – функциями второй производной от показателя преломления среды $\left(\frac{\partial^2 n}{\partial x^2}; \frac{\partial^2 n}{\partial y^2}; \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} \right)$ [1].

Прямотеневой метод визуализации течений

Наиболее простым методом визуализации является прямотеневой метод, регистрирующий вторую производную показателя преломления среды. Схема его реализации в баллистическом эксперименте представлена на рис. 1, 2. На рис. 1 представлена картина обтекания конуса, а на рис. 2 – стереопара выстрела из дробового ружья.

Основным элементом, влияющим на качество визуализации в этом методе, является яркий импульсный точечный источник света. Данные снимки получены с помощью искрового источника длительностью 1 мкс и энергией порядка 1 Дж. Размер искры был порядка 1 мм. Этот метод хорошо работает при нормальных атмосферных условиях.

Визуализация теневыми приборами

На аэродинамических трубах для визуализации сверхзвуковых и околозвуковых

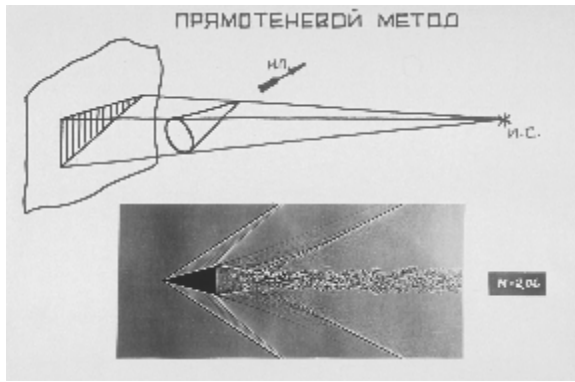


Рис. 1

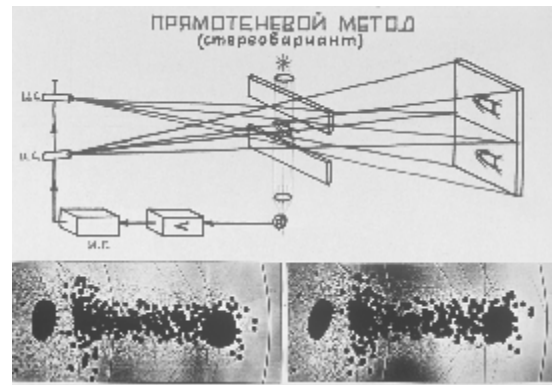


Рис. 2

течений широко используются серийные теневые приборы, например ИАБ 451 с полем визуализации диаметром 230 мм производства Казанского оптико-механического завода. Схема теневого прибора, работающего по методу Теплера, представлена на рис. 3 [2]. Для выделения структуры потока требуется источник света малых размеров, это достигается с помощью фокусировки изображения нити лампы накаливания (1) на осветительную диафрагму (3). Фокусировка производится с помощью линзы конденсора (2). Штатная диафрагма представляет из себя щель, размер которой регулируется микрометричес-

ким винтом. Исследуемый объем пространства просвечивается параллельным пучком света, исходящим из осветительной диафрагмы. Пучок может быть сформирован или линзовой системой, как было предложено Теплером, или зеркальной системой, как сделано в приборе ИАБ 451 (рис. 3). После прохождения рабочей части аэродинамической трубы (5) с объектом исследования (6) лучи снова собираются в фокусе приемной части оптической системы (линзовой или зеркальной). Вблизи этого фокуса располагается визуализирующая диафрагма (7) - нож Фуко. При прохождении объекта (6) параллель-

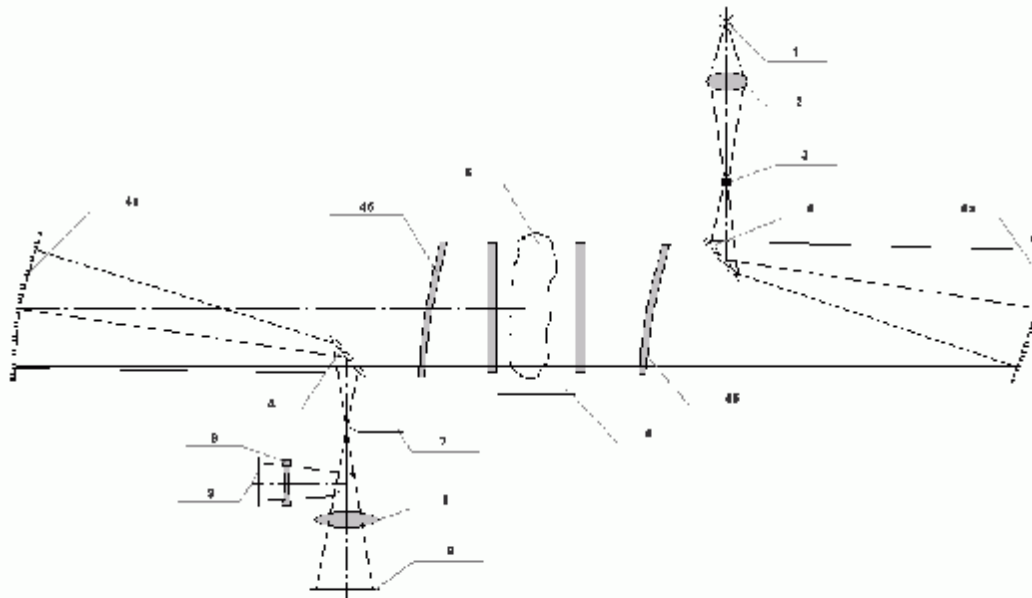


Рис. 3

1 - источник света, 2 - конденсор, 3 - осветительная диафрагма, 4а - элемент поверхности сферического зеркала, 4б - мениск для компенсации aberrаций сферического зеркала, 5 - рабочая часть аэродинамической трубы, 6 - исследуемый объект, 7 - визуализирующая диафрагма (нож Фуко), 8 - объектив, 9 - экран

ность лучей нарушается из-за изменения показателя преломления. Изменением положения ножа Фуко можно, например, убрать из светового пучка лучи, отклоненные на тот или иной угол. При этом в плоскости изображения (9), которую формирует объектив (8), будут затемнены области, вызвавшие отклонения лучей. Визуализирующей диафрагмой может быть не только острая кромка ножа, но и другие приспособления, например, нить и т. д. Примеры изображений, полученных с помощью теневого прибора с линзовой системой и различными визуализирующими диафрагмами, представлены на рис. 4, 5.

На рис. 4 представлено обтекание заостренного цилиндра и осесимметричного воздухозаборника, на рис. 5 представлено обтекание профиля при различных положениях визуализирующей нити. Метод по праву является классическим и широко используется

в аэродинамическом эксперименте.

Интерферометр Маха-Цендера

В классическом интерферометре происходит суперпозиция двух световых потоков, один из которых проходит исследуемую область, а другой является опорным. Схема подобного интерферометра и результаты представлены на рис. 6. Недостатком данной схемы является значительная вибросensitivity и большой вес системы (порядка 1000 кг), что исключает ее мобильное использование.

Интерферометр сдвига

Данный недостаток лишен интерферометр сдвига, разработанный Государственным Оптическим Институтом им. академика С. И. Вавилова (ГОИ) по техническому заданию ЦАГИ. Схема прибора и его внешний вид представлены на рис. 7.

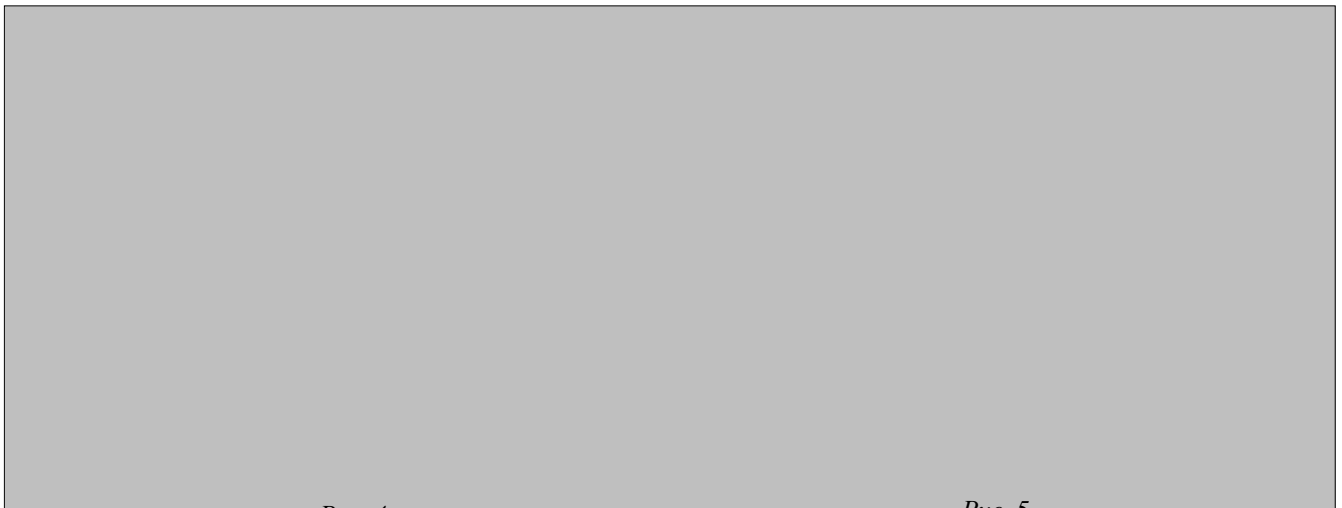


Рис. 4

Рис. 5

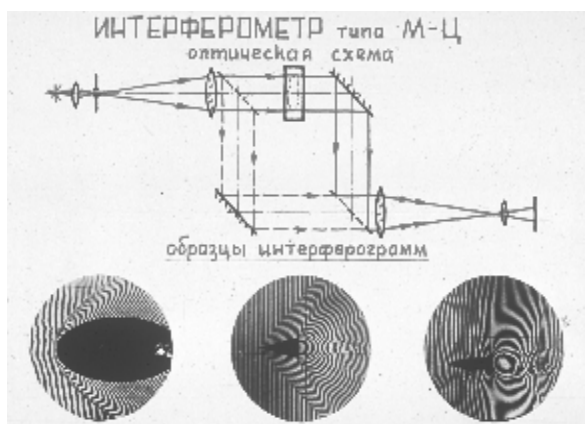


Рис. 6



Рис. 7

Универсальный интерферометр сдвига (примерные размеры 250*250*400 мм) предназначен для исследования прозрачных неоднородностей в твердых, жидких и газообразных средах, для исследования качества поверхностей вогнутых сферических и асферических поверхностей и, главным образом, для исследования газодинамических полей большого размера. Интерференция в этой схеме достигается путем наложения двух световых потоков, прошедших одну и ту же неоднородность, но сдвинутых относительно друг друга в боковом направлении. Величина сдвига может меняться в широком диапазоне. Результаты использования интерферометра сдвига представлены на рис. 8. Прибор работал в основном варианте системы со сферическим зеркалом диаметром $\varnothing=500$ мм и радиусом кривизны $R = 5000$ мм. Сферическое зеркало и собственно прибор устанавливались по обе стороны рабочей части аэродинамической трубы на отдельных неамортизированных основаниях.

Визуализация крупномасштабных вихревых структур в турбулентной струе

Фото и видеорегистрация чистой струи и струи, возбужденной гармоническим акустическим сигналом, проводилась в акустической заглушенной камере размером $10 \times 5 \times 4,7 \text{ м}^3$ [3]. Исследовалась холодная струя, истекающая из конического сопла диаметром 4 см со скоростью 40-140 м/с ($M = 0,12 \dots 0,42$). В отдельных экспериментах скорость истечения струи составляла 200 м/с. Источником продольного акустического возбуждения служил

громкоговоритель. Частота акустического возбуждения f_{ex} изменялась в диапазоне 600-2500 Гц. Для выделения в струе крупномасштабных вихревых структур на фоне некоррелированных мелкомасштабных пульсаций применялся метод, который можно назвать методом оптического усреднения. Изображение исследуемой части струи многократно экспонируется на один и тот же кадр, при этом повторяющиеся события выделяются, а случайные - сглаживаются. Регистрация осуществлялась в проходящем свете с использованием интерферометра сдвига. Источник света был импульсный, работающий в режиме стробоскопа, с частотой световых импульсов, которые можно плавно изменять в диапазоне 0 - 300 Гц. Частота световых стробоскопических импульсов $f_s = f_{ex}/n$ выбиралась максимально возможной так, чтобы выполнялось условие $f_s \leq 300 \text{ Hz}$. При такой частоте периодически возникающие события в одном и том же месте струи (здесь это периодически образующиеся на начальном участке струи вихревые кольца) многократно экспонируются на один кадр, а небольшое расхождение частоты стробоскопа и частоты облучения позволяет добиться эффекта высокоскоростной видеосъемки применительно к повторяющимся событиям.

На рис. 10 представлены видеок cadры возбужденной струи при различных скоростях истечения, полученные при стробоскопическом освещении и настройке интерферометра на горизонтальный сдвиг волновых фронтов. С помощью интерферометра сдви-

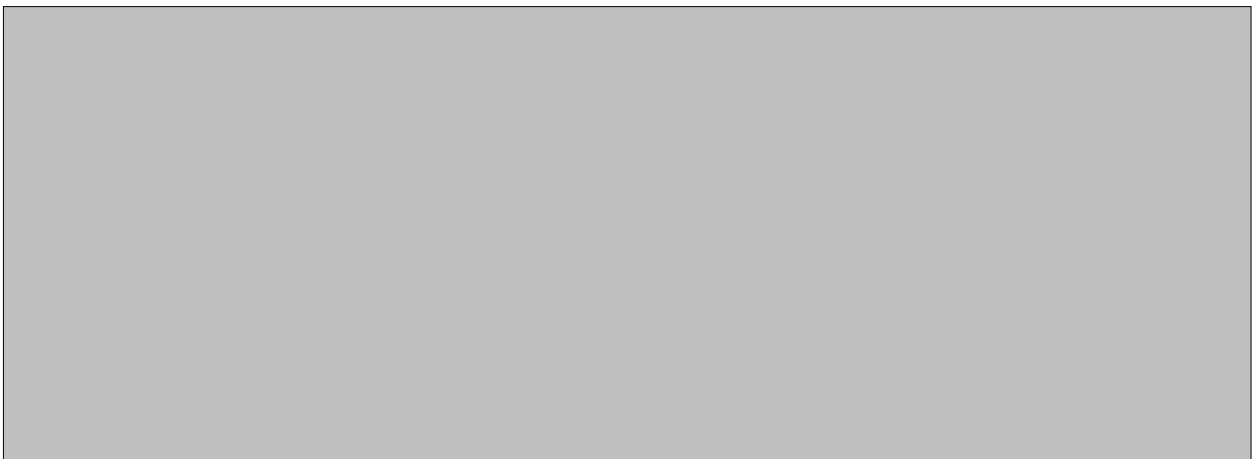


Рис. 8

Рис. 9

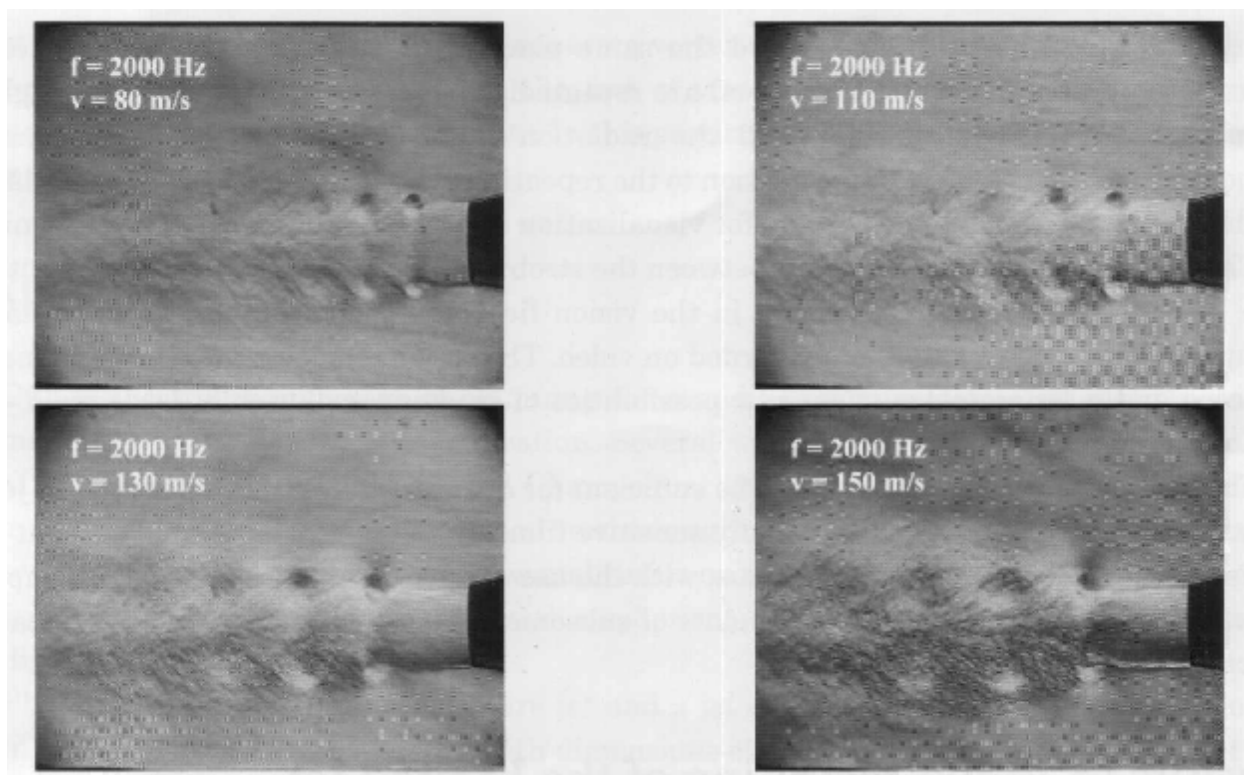


Рис. 10

га была зарегистрирована динамика движения отдельного вихревого кольца в воздухе (рис. 11).

Заключение

В результате представленной работы показано, что теневые и интерференционные методы по-прежнему являются надежным средством визуализации течений. В частности:

- Прямотеневой метод является наиболее простым при визуализации ударных волн при нормальном давлении и температуре.

- Классический метод Теплера с различными визуализирующими диафрагмами надежно выделяет оптические неоднородности в широком диапазоне плотностей газа, но из-за своих массогабаритных характеристик оборудование, реализующее этот метод, является стационарным.

- Система визуализации с интерферометром сдвига обеспечивает визуализацию и качественный анализ двухмерных дозвуковых течений вокруг моделей при скоростях набегающего потока $v \geq 20$ м/с без местного подогрева при длине хода световых лучей в неоднородной зоне ~2 м.

- Использование сдвигового интерферометра совместно со стробоскопическим освещением позволило выявить динамику когерентных структур в струе.

- Последняя система может работать в мобильном варианте.



Рис. 11

Список литературы

1. Н. Schardin. Die Schlierenverfahren und ihre Anwendungen. Ergebnisse der exacten Wissenschaften, XX, 1942.

2. Л. А. Васильев Теневые методы. - М,

1968.

3. Kopiev V. F., Zaitsev M. Yu., Inshakov S. I., Guriashkin L. P. Visualization of Large-scale Vortex Structures in Excited Turbulent Jets, Journal of Visualization, Vol. 6, No 3(2003).