



УДК 533.6.071.3:535.3

В. Е. Мошаров, В. Н. Радченко

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского,
г. Жуковский, Россия

МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА НА ПОВЕРХНОСТИ

В работе дан обзор оптических методов исследования течений газа на поверхности твердых тел – аэродинамических моделей. Рассматриваются как классические методы, рассчитанные на визуальное восприятие и регистрацию на фотопленку, так и новые, появившиеся благодаря развитию матричных приемников света и компьютерной обработки изображений.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ, ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ, ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, ПОЛЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА, ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ ТОКА, ОТРЫВ ПОТОКА, ПЕРЕХОД ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

1. ВВЕДЕНИЕ. Силы, моменты сил, тепловые потоки, действующие на летательный аппарат, зарождаются на границе раздела твердое тело – газ. Весовые измерения и точечные замеры давления и температуры не позволяют понять физику трехмерных течений и не могут служить надежным способом верификации расчетных методов. Поэтому с развитием расчетных методов значение визуализации не уменьшается. Под визуализацией здесь понимается и исследование структуры течения (положение скачков уплотнения, областей отрыва потока, перехода пограничного слоя), и измерение полей физических величин (давления, температуры, напряжения трения).

2. КЛАССИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ, рассчитанные на визуальное восприятие и регистрацию на фотопленку.

2.1. Метод шелковинок, несомненно, старейший метод экспериментальной аэродинамики. Он состоит в том, что к поверхности модели приклеиваются в большом количестве нити или пучки нитей (шелковинок) которые в потоке выстраиваются по вектору скорости, а в отрывных зонах совершают колебательные движения. Для увеличения контраста изображения используют белые нити, а поверхность модели окрашивают в черный цвет. Всегда остается открытым вопрос о влиянии шелковинок на обтекание модели.

Развитием метода является переход на тонкие люминесцентные нити [1], которые меньше влияют на течение и позволяют повысить пространственное разрешение.

Метод шелковинок хорош для нахождения областей отрыва потока, но построить по положению шелковинок линии тока практически невозможно.

2.2. Метод масляной пленки и метод размываемых точек является одним из наиболее распространенных методов [2]. Метод состоит в нанесении на поверхность модели слоя масла или точек масла, содержащего порошкообразный пигмент. Под маслом в данном случае понимается вязкая жидкость, в качестве которой наиболее часто используется моторное масло или смесь моторного масла с керосином; пигментом, как правило, служат сажа или люминесцирующие порошки. Под действием воздушного потока масло течет по поверхности модели, оставляя следы пигмента вдоль линий тока и накапливаясь в зонах отрыва потока. Использование масел различных цветов позволяет проследить перетекание газа с одной поверхности на другую. Люминесцентные пигменты позволяют увеличить контраст визуализируемой картины обтекания и исключить предварительную окраску поверхности модели в белый цвет.

Главным недостатком этого метода является то, что за один пуск можно исследовать только один режим обтекания модели. Второй недостаток состоит в том, что масло начинает течь сразу при запуске трубы и визуализированная картина течения в области передних кромок модели соответствует нерасчетному обтеканию. Для уменьшения этих областей вязкость масла должна быть достаточно большой, чтобы за время выхода на режим не было существенного смещения масла, а продолжительность пуска должна быть много больше времени запуска. Все это делает метод весьма трудоемким и дорогим в использовании.

Иногда удается избежать влияния запуска трубы на картину обтекания. Например, в трубах с подогревом воздуха на модель наносятся точки лака, который при нормальных температурах твердый. В потоке с прогревом модели лак размягчается и начинает течь и таким образом визуализирует предельные линии тока.

2.3. Сублимационные методы используются главным образом для визуализации ламинарно-турбулентного перехода [3]. Принцип действия этих методов основан на том, что в турбулентном пограничном слое резко возрастает массообмен и, соответственно, скорость испарения летучих веществ, нанесенных на поверхность модели. На поверхность модели обычно наносятся ароматические соединения: или аценафтен, или нафталин, в зависимости от температуры торможения потока. Наносятся эти вещества из раствора (например, ацетона) пульверизатором. Лучший контраст достигается на моделях, окрашенных черной краской.

Раньше широко использовалось коалиновое покрытие, которое пропитывалось летучей жидкостью, например ацетоном. Мокрое коалиновое покрытие имеет серый цвет, а сухое – белый, что обеспечивает хороший контраст линии перехода. Смачивать коалин можно многократно. Классическое коа-

линовое покрытие достаточно толстое, что искажает геометрию модели, и шершавое, что может исказить свободный переход.

К недостаткам сублимационных методов следует отнести одноразовость (каждый исследуемый режим требует отдельного пуска и подготовки модели) и опасность для здоровья ароматической органики и органических растворителей.

2.4. Термоиндикаторы плавления меняют свои светорассеивающие свойства (становятся прозрачными) при достижении определенной температуры. В аэродинамических испытаниях могут использоваться только термоиндикаторы, температура плавления которых не зависит от давления. По мере прогрева модели по ее поверхности пробегает изотерма, положение которой фиксируется с помощью кино или видеосъемки. Несмотря на множество недостатков (одноразовость, неодномоментность измерения температуры поверхности, значительная толщина и расход энергии на фазовый переход), термоиндикаторы плавления сыграли и продолжают играть выдающуюся роль в исследовании тепловых потоков [4].

3. ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ МЕТОД базируется на том, что собственное излучение тела определяется его температурой (закон излучения Планка). Поле температуры измеряется с помощью тепловизора – прибора, регистрирующего ИК-излучение. Температура измеряется с точностью до излучательной способности (степени черноты) исследуемого тела. Современные тепловизоры обходятся без жидкого азота и имеют разрешение по температуре до сотых долей градуса. Пространственное разрешение тепловизоров пока значительно уступает ССД камерам и находится на уровне 320x240 пикселей, у лучших образцов 640x480. Тепловизоры широко применяются для визуализации ламинарно-турбулентного перехода [5] (при этом на поверхность модели должно быть нанесено теплоизоляционное покрытие), а также для измерения тепловых потоков. Считывание информации с матрицы тепловизора осуществляется последовательно, что бывает необходимо учитывать при измерении тепловых потоков. Использование тепловизоров затруднено в условиях тепловой (ИК) подсветки.

4. ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ – вещества, которые меняют свою структуру в зависимости от температуры или касательного напряжения. Жидкие кристаллы наносятся на черную подложку, поглощающую свет, прошедший через слой жидких кристаллов. Вне диапазона измерения кристаллы прозрачны. В рабочем диапазоне цвет отражаемого света меняется в зависимости от температуры или касательного напряжения и, таким образом, цвет является измеряемой величиной. Существует оптимальное направление наблюдения, под которым величина рассеянного света максимальна. Несомненный плюс жидких кристаллов – их обратимость (многоразовость).

4.1. Жидкие кристаллы, чувствительные к температуре, позволяют визуализировать переход пограничного слоя, зоны отрыва потока и измерять тепловые потоки [6].

4.2. Жидкие кристаллы, чувствительные к касательному напряжению, позволяют визуализировать распределение трения и, в частности, переход пограничного слоя [7]. Напряжение трения – векторная величина, и для ее измерения необходимо регистрировать рассеянный свет с двух разных направлений.

Однако жидкие кристаллы не нашли достаточно широкого распространения в экспериментальной аэродинамике, что, по-видимому, можно объяснить сложностями нанесения на исследуемую поверхность.

5. НОВЫЕ МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ основаны на матричных фотоприемниках и компьютерной обработке изображений. Цифровые камеры с матричными фотоприемниками имеют два принципиальных преимущества перед фотопленкой: строгое позиционирование изображения на матрице и точное измерение интенсивности света.

Строгое позиционирование привело к созданию метода измерения полей скорости потока по изображению частиц, известного как метод PIV (Particle Image Velocimetry), а на поверхности – к методу, рассмотренному в 5.1.

5.1. Поверхностная визуализация по изображениям частиц. Идея метода состоит в том, что на поверхность модели наносится тонкий слой масла, содержащего контрастные (люминесцирующие) частицы, и на исследуемом режиме течения регистрируются два изображения этих частиц с некоторым интервалом по времени. С помощью кросскорреляционного анализа двух этих изображений находятся смещения частиц так же, как это делается в методе PIV. Величина сдвига частиц пропорциональна напряжению трения, а направления сдвигов частиц совпадают с предельными линиями тока, что позволяет численно реконструировать линии тока. Так как для анализа обтекания необходимы только небольшие смещения пленки масла с частицами, можно исследовать несколько режимов обтекания в одном пуске без остановки потока и переподготовки модели [8].

5.2. Люминесцентные преобразователи давления [9]. Возможность точного измерения интенсивности света позволила использовать методы, в которых интенсивность света плавно связана с измеряемым параметром. Метод люминесцентных преобразователей давления (ЛПД), известный за рубежом как метод чувствительных к давлению красок (Pressure Sensitive Paint (PSP)), основан на явлении тушения люминесценции органических люминофоров кислородом воздуха. Для его реализации поверхность модели покрывается специальной краской, представляющей собой тонкий слой полимера, проницаемого для кислорода и содержащего молекулы люминофора. Люминофор возбуждается светом соответствующей длины волны, а ин-

тенсивность люминесценции обратно пропорциональна давлению. Получаемые поля давления используются для вычисления сил и моментов, действующих на отдельные элементы летательных аппаратов.

5.3. Люминесцентные преобразователи температуры. Методики применения люминесцентных преобразователей температуры (ЛПТ) и давления очень близки, с той лишь разницей, что ЛПТ чувствительны к температуре и нечувствительны к давлению, а ЛПД чувствуют и то и другое. ЛПТ используются для измерения тепловых потоков и для исследования ламинарно-турбулентного перехода, и при этом они конкурируют с тепловизорами, термоиндикаторами плавления и жидкими кристаллами.

Наиболее успешно ЛПТ применяются в криогенных трубах [10] и трубах кратковременного действия [11]. В криогенных трубах, которые используются для достижения больших чисел Рейнольдса, приближенных к натурным, необходимо визуализировать свободный переход пограничного слоя. Температура поверхности модели при этом составляет 110–140 К, и тепловизор измерять такие температуры не может, невозможно использовать и жидкие кристаллы.

Одновременность измерения температуры является важным преимуществом ЛПТ и перед термоиндикаторами плавления, и перед жидкими кристаллами. Кроме того, ЛПТ не поглощают энергию для фазового перехода и могут иметь небольшую толщину, что также снижает их теплоемкость и позволяет использовать в трубах кратковременного действия.

6. УПРУГИЕ ПОКРЫТИЯ. Идеи наносить на поверхность модели упругие покрытия и измерять их деформацию возникают периодически. Каждый раз предлагаются новые способы измерения деформации: голография, интерферометрия, спеклография, люминесценция [12, 13]... Но на сегодня нет ни одной используемой методики. Необходимо отметить, что покрытие в потоке деформируется и под действием давления, и под действием напряжения трения, и разделение этих сил – отдельная задача. Для обеспечения приемлемой чувствительности такие покрытия должны быть достаточно толстыми, что, с одной стороны, создает технологические проблемы с их нанесением и искажает геометрию модели, а с другой стороны, может оказывать воздействие на течение из-за возникновения на поверхности покрытия стоячих и бегущих упругих волн.

7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Crowder J.P.** // Handbook of flow visualization. Tufts / Ed. by Wen Jei Yang. N.Y.: Taylor & Francis, 2001. P. 131.
2. **Бражко В.Н.** Способ визуализации линий тока на поверхности моделей в аэродинамических трубах // Труды ЦАГИ. Вып. 1749, 1976.
3. **Obara C.J.** Sublimating Chemical Technique for Boundary-Layer Flow Visualization in Flight Testing // J. Aircraft. V.25. No. 6. 1988.

4. **Применение** термоиндикаторных покрытий в исследованиях теплообмена / Ардашева М.М., Боровой В.Я., Давлет-Кильдеев Р.З. и др. // Труды ЦАГИ. Вып.1692. 1975.
5. **Infrared** Thermography as a Tool for Thermal Surface Flow Visualization / G.M. Carlomango, G. Cardone, C. Meola et.al. // Journal of Visualization. V.1. No. 1. 1998.
6. **Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Petrov A.P.** The quantitative temperature visualization for heat transfer study // ISFV12 CD ROM Proceedings Göttingen, Germany. 2006.
7. **Gaudet, L. and Gell, T.G.** Use of liquid crystals for qualitative and quantitative 2-D studies of transition and skin friction // Proc. 13th Int Conf on Instrumentation inAero-space Simulation Facilities, DFVLR, Gottingen, Germany. P. 66-81. 1989.
8. **Mosharov V.E., Orlov A.A., Radchenko V.N.** Application of Correlation Analysis in Surface Flow Visualization with Oil Film // Proc. of SPIE / Ed. by Y.N. Dubnistchev, B.S. Rinkevichyus. Bellingham: SPIE, WA. 2006. V.6262. P. 62620B.
9. **Application** of Pressure Sensitive Paint for Determination of Aerodynamic Loads and Moments on Propeller Blade / V.P. Kulesh, V.E. Mosharov, A.A. Orlov et. al. // Proc. of SPIE / Ed. by Y.N. Dubnistchev, B.S. Rinkevichyus.. Bellingham: SPIE, WA. 2006. V.6262. P.62620K.
10. **Мошаров В.Е., Радченко В.Н.** Измерение полей тепловых потоков в трубах кратковременного действия с помощью люминесцентных преобразователей температуры // Ученые записки ЦАГИ. 2007. Т. XXXVIII. №1-2. С.94-101.
11. **Fey U., Egami Y., Engler R. H.** High Reynolds number transition detection by means of temperature sensitive paint // AIAA Paper 2006-514
12. **Hamner M.P.** Developing new nano-materials for use as pressure-sensitive coatings // Meas. Sci. Technol. 19. 2008
13. **Identification** of Pressure Measurement Systems based on Surface Stress Sensitive Films and Pressure Sensitive Paints / S.D. Fonov, L.P. Goss, E.G. Jones et. al. // ICIASF'05 Records / IEEE Catalog Number: 05CH37670C. 2005. P.123-127.

V.E. Mosharov, V.N. Radchenko

Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Russia

METHODS OF SURFACE FLOWS VISUALIZATION

Optical methods of surface gas flow visualization are reviewed. Both classical methods based on visual sensing or photo recording, and new methods operated with CCD and CMOS array detectors and computational image processing are considered.

VISUALIZATION, PRESSURE FIELDS, TEMPERATURE FIELDS, HEAT FLUX FIELDS, SURFACE STREMLINES, FLOW SEPARATION, BOUNDARY LAYER TRANSITION