

УДК 533.6.011.72

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА  
ИМПУЛЬСНЫМ ОБЪЕМНЫМ РАЗРЯДОМ\****И. А. Знаменская, Т. А. Кули-заде, И. В. Степанец**Московский авиационный институт,  
125871 Москва*

Большинство известных в настоящее время методов визуализации потоков газа применимы для исследования стационарных и квазистационарных процессов с характерными временами более миллисекунды. Визуализация быстротекущих взаимодействий газодинамических возмущений и разрывов осуществляется преимущественно традиционными теневыми и интерференционными голографическими методами, имеющими существенные ограничения по чувствительности и по диапазону плотностей газа.

В ряде работ [1, 2] электрический разряд использовался для визуализации стационарных течений газа с ударными волнами. Локальная интенсивность свечения газа в области разряда связана с газодинамическими параметрами потока и параметрами электрического поля [3]. Наиболее сложной является эта связь в области фронта ударной волны.

Исследования влияния ионизации на распространение ударных волн показали, что в тлеющем, ВЧ- и СВЧ-разрядах меняются скорость, амплитуда и структура ударных волн [4, 5]. Эти изменения связаны как с нагревом газа, так и с неравновесным возбуждением молекул. Таким образом, при визуализации стационарным разрядом в течение газа вносятся существенные изменения, и можно говорить о визуализации потока газа, ионизованного разрядом.

Ряд ограничений, возникающих при использовании электрического разряда для визуализации газодинамических процессов, может быть устранен при условии создания в исследуемом объеме высокооднородного импульсного разряда с временем свечения, много меньшим характерных газодинамических времен. Такие условия создаются на установке УТРО (ударная труба—разряд—оптика), представляющей собой комбинацию ударной трубы со специальной разрядной камерой [6].

Внутреннее сечение ударной трубы 24 × 48 мм, число Маха ударных волн  $M = 1,1 - 6$ , длительность течения в сверхзвуковом потоке 200–400 мкс, начальное давление в спутном потоке до 50 кПа. Для организации объемного разряда в рабочей камере, переходящей в канал ударной трубы, была использована схема разряда с плазменными электродами, применяемая в лазерной технике [7]. Высокая степень пространственной однородности разряда обеспечивалась предыонизацией ультрафиолетовым излучением от плазменных электродов — листов, скользящих по поверхности диэлектриков, расположенных на верхней и нижней стенках камеры заподлицо с каналом ударной трубы. Степень однородности проверялась специальной съемкой с торцов камеры и постоянно контролировалась через боковые стенки, изготовленные из кварцевого стекла. Условием однородного свечения воздуха в области разряда является наличие одно-

\* Работа выполнена при поддержке КВШ (грант ФИЗМАТ «Физико-технические проблемы распространения возмущений в сплошных средах применительно к задачам энергетики, экологии и космических исследований»).

родной газовой среды (неподвижной либо плоского течения) в диапазоне плотностей от  $8 \text{ г/м}^3$  до  $0,2 \text{ кг/м}^3$ . Наличие в потоке воздуха неоднородностей и разрывов приводит к неоднородной ионизации объема. В случае, если неоднородности примыкают к плазменным электродам, скользящий разряд зажигается неравномерно. Коэффициент ионизации  $\alpha$  является нелинейной функцией  $E/N$ , и неоднородности плотности ведут к перераспределению тока за счет зависимости концентрации электронов от  $\alpha$ . О мгновенных локальных профилях плотности частиц в области разряда дает информацию распределение интенсивности свечения соответствующих элементов потока. Следует учитывать, что возможно насыщение концентрации возбужденных частиц, населяющих уровни, с которых регистрируется излучение в различных областях разрядного объема.

Временные характеристики свечения газа в области разряда и динамика пространственного распределения интенсивности свечения элементов потока за время импульса исследовались с использованием электронно-оптических камер АГАТ-СФ-3М (скорость развертки  $50 \text{ нс/см}$ ) и ФЭР-7 (скорость развертки  $125$  и  $250 \text{ нс/см}$ ). Анализ фоторазверток показал, что время свечения ионизованного потока воздуха составляет  $150\text{--}180 \text{ нс}$ . При интегральной регистрации свечения экспозиция является мгновенной с точки зрения газодинамического временного масштаба. Развертки свечения элементов течения показали, что перераспределения параметров за время протекания тока не происходит.

Интегральная регистрация свечения — метод импульсной диагностики потока с визуализацией поля [8]. Инициирование разряда в потоке газа позволяет визуализировать неоднородности и скачки в заданный момент газодинамического процесса. Система синхронизации через пьезодатчики в канале трубы обеспечивала необходимую задержку поджига разряда.

При визуализации стационарных газодинамических течений (сверхзвуковое обтекание модели) схема эксперимента была следующей: плоская ударная волна с  $M = 2,5\text{--}5,5$  из канала ударной трубы входит в разрядную камеру, происходит дифракция на модели, закрепленной по оси камеры, устанавливается сверхзвуковое обтекание модели (за  $30\text{--}40 \text{ мкс}$ ), иницируется разряд.

На рис. 1 приведена фотография поля течения около затупленного цилиндра при давлении в набегающем потоке  $P = 33 \text{ кПа}$ , числе Маха сверхзвукового обтекания  $1,5$  и напряжении на разрядном промежутке  $30 \text{ кВ}$ . На рис. 2 приведена фоторазвертка свечения области ударного слоя вдоль оси симметрии  $X$ .

Были получены также изображения плоской ударной волны в разрядной камере. Разряд иницировался в различные моменты прохождения ударной волны вдоль разрядного промежутка. Ионизация газа (и формирование плазменных листов) происходила только перед ударной волной — в области низкой плотности и давления. При увеличении энерговклада перед волной имело место монотонное усиление интенсивности свечения в направлении к фронту. При отсутствии закорачивающих элементов длительность свечения потока не превышает  $200 \text{ нс}$ . Минимальное проявление эффектов, связанных с действием ионизации на поток газа, обусловлено малым временем протекания тока

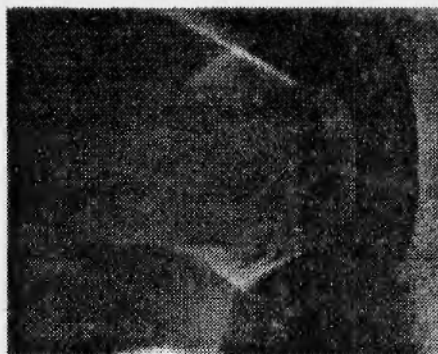


Рис. 1

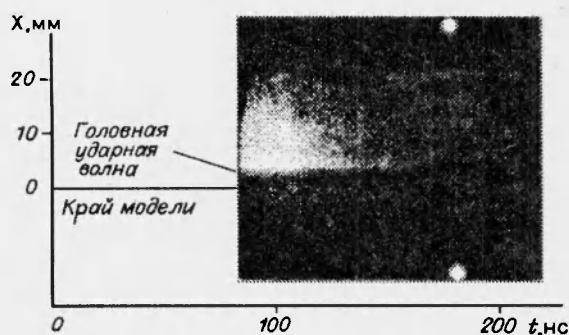


Рис. 2

и высокой пространственной однородностью области разряда. Сравнение полученных изображений с соответствующими теневыми, интерференционными картинами демонстрирует высокую чувствительность метода к слабым возмущениям; возможность его использования в области низких давлений (от 130 Па) также относится к числу преимуществ метода. В отличие от любого вида зондирования, предложенный

метод дает возможность визуализировать поток через одно окно рабочей камеры.

Таким образом, предложенный метод визуализации позволяет регистрировать с высокой чувствительностью возмущения плотности и разрывы в широком классе потоков газа, а также характер относительного изменения плотности в области возмущений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Nishio M. Method for visualizing streamlines around hypersonic vehicles by using electrical discharge // AIAA J. 1992. V. 30, N 6.
2. Сенковенко С. А. Методы визуализации ударных волн в сверхзвуковых потоках газа и плазмы // Физические методы исследования прозрачных неоднородностей. М.: О-во «Знание» РСФСР, 1988.
3. Алферов В. П., Дмитриев Л. М. Электрический разряд в потоке газа при наличии градиентов плотности // Теплофизика высоких температур. 1985. Т. 23, № 4.
4. Великович А. Л., Либерман М. А. Физика ударных волн в газах и плазме. М.: Наука, 1987.
5. Быстров С. А., Заслонко И. С., Мукосеев Ю. К., Шугаев Ф. В. Предвестники перед фронтом ударной волны в плазме ВЧ-разряда // Докл. АН СССР. 1990. Т. 310, № 1.
6. Андреев С. И., Знаменская И. А., Степанец И. В. Ударный слой в воздухе, возбужденном объемным разрядом // Хим. физика. 1993. Т. 12, № 3.
7. Баранов В. Ю., Борисов В. М., Степанов Ю. Ю. Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов. М.: Энергоатомиздат, 1988.
8. Знаменская И. А., Кули-заде Т. А., Степанец И. В. Регистрация пространственно-временной структуры сверхзвукового течения с высоким разрешением // 16-я науч.-техн. конф. по высокоскоростной фотографии, фотонике и метрологии быстропотекающих процессов: Тез. докл. М., 1993.

Поступила в редакцию 9/VI 1994 г.