

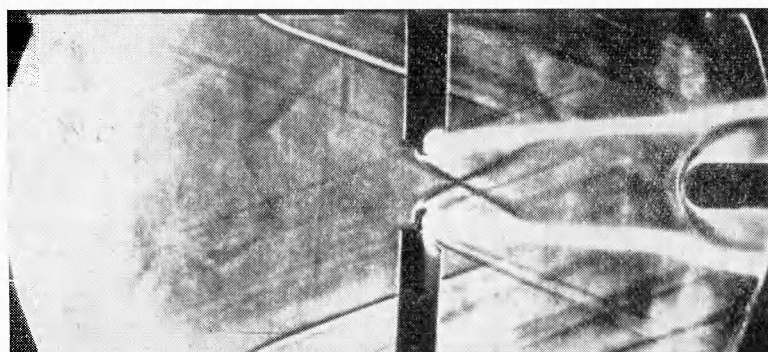
## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ПРЕДПРОБОЙНОГО РАЗРЯДА

*В. И. Алферов, Б. В. Калачев*

(Москва)

Описана схема визуализации слабых газодинамических неоднородностей с помощью предпробойного разряда. Свечение, вызванное предпробойным разрядом, использовалось для наблюдения вихревых зон на подветренной стороне моделей, помещенных в сверхзвуковой поток.

Для визуализации сверхзвуковых течений в аэродинамических трубах низкого давления широкое распространение получили методы, основанные на использовании свечения возбужденных электронным ударом молекул газа. К наиболее употребительным способам возбуждения относится способ электронного луча [1,2] и электрического разряда (тлеющего) [3-7]. Используются различные зоны тлеющего разряда, но наиболее благоприятной для визуализации является область положительного столба.



Фиг. 1

В обоих способах используется один и тот же механизм возбуждения свечения — электроны, разогнанные электрическим полем, возбуждают или ионизируют молекулы газа. При этом интенсивность свечения, как правило, пропорциональна плотности газа. Это обусловлено тем, что функция возбуждения молекул газа слабо зависит от энергии электронов в тех диапазонах энергий, которые обычно используются для визуализации. Поэтому, несмотря на то, что энергия электронов меняется при переходе их областей с различной плотностью из-за изменения длины свободного пробега, как это имеет место при визуализации тлеющим разрядом, или уменьшается вследствие столкновений при прохождении электронного пучка через газ, интенсивность свечения зависит только от числа молекул газа в единице объема при фиксированном числе электронов. Следовательно, изучение тонкой структуры потока таким способом затруднено.

Известно, что функции возбуждения молекул газа электронным ударом в определенных диапазонах энергий электронов носят ярко выраженный пороговый характер [8,9]. Если использовать этот эффект для визуализации течений газа, то следует ожидать, что изменение яркости свечения при небольшом изменении энергии электронов будет значительным.

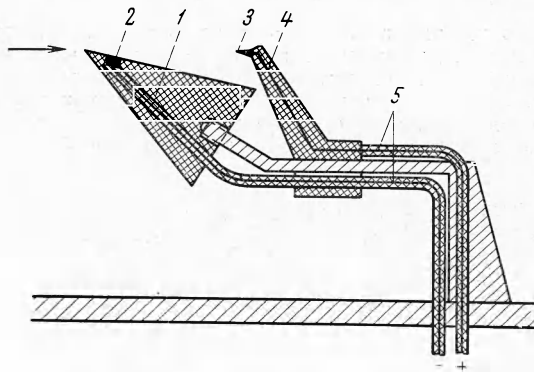
Однако использовать этот эффект для визуализации тлеющим разрядом не представляется возможным, так как при уменьшении напряжения на разрядном промежутке уменьшается сила тока, а следовательно, и число электронов. При энергии электронов, необходимой для получения порогового эффекта, ток в тлеющем разряде оказывается столь малым, что свечение, вызванное возбуждением, недостаточно для получения видимой картины.

При фиксированном напряжении на электродах, можно уменьшить энергию электронов до порогового значения, увеличивая плотность газа. Этот эффект наблюдался в предпробойном разряде, описанном в работах [10,11].

Ниже приводятся некоторые результаты применения порогового эффекта для визуализации слабых газодинамических неоднородностей. Определялось положение вихревых зон у тел, обтекаемых сверхзвуковым потоком. Статическое давление потока при этом менялось от  $0.5 \cdot 10^4$  до  $1.5 \cdot 10^4$  н/м<sup>2</sup>.

Для обеспечения наилучшего эффекта при визуализации было опробовано несколько схем расположения электродов и модели, подбирались необходимая конфигурация электрического поля. Дело в том, что область свечения разряда резко уменьшается с увеличением давления газа, поэтому описанные в литературе [3-7] схемы оказались непригодными.

В ходе исследований выяснилось, что если поместить модель в зону свечения разряда, то визуализируемая картина течения отличается от действительной. По-видимому, имеет место электростатическое взаимодействие заряженных частиц, находящихся в потоке, с моделью, которая, как правило, заряжается отрицательно относительно плазмы. Это особенно ярко проявилось в экспериментах с диффузным разрядом [11], когда положение головной ударной волны фиксировалось одновременно при помощи теневого прибора и разряда (фиг. 1). Светящееся образование перед моделью, которое



Фиг. 2

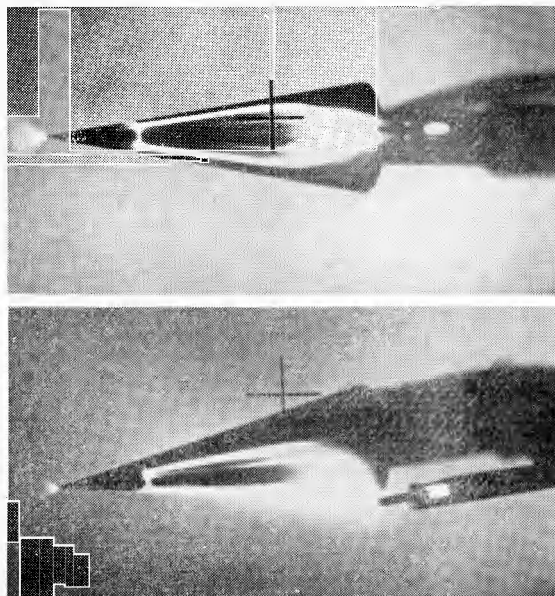
можно было принять за головную волну, отстоит значительно дальше от модели, чем волна. На этот факт следует обращать внимание при визуализации тлеющим разрядом в аэродинамических трубах низкого давления в том случае, если нет возможности провести контроль с помощью теневого прибора. В процессе отработки метода была опробована схема, в которой модель являлась анодом, а корпус трубы — катодом. Эта схема оказалась непригодной из-за того, что напряженность электрического поля недостаточна для получения яркого свечения, повышение яркости за счет увеличения напряженности приводило к пробоем с острых кромок модели. Для увеличения напряженности электрического поля область разряда была уменьшена до размеров зоны, в которой изучалось течение (фиг. 2). Модель 1 была изготовлена из изоляционного материала с металлической вставкой 2, которая являлась одним из электродов. Вторым электродом являлся заостренный металлический стержень 3, помещенный так, чтобы возмущения потока, вызываемые этим электродом и его державкой 4, не достигали исследуемой области. Напряжение на электроды подавалось от высоковольтного выпрямителя кабелями 5. Существенной оказалась полярность электродов — в случае, когда анодом являлась вставка, около нее возникала корона, и только при подаче отрицательного потенциала на вставку отчетливо визуализировались вихри в зоне, существовавшие около модели.

Фотографирование производилось с помощью камеры «АНФ-21».

В процессе экспериментов выяснилось, что ток разряда зависит от размера вихревых зон: при изменении угла атаки модели, когда менялся размер вихревой зоны, ток разряда также менялся. Этот факт может быть использован для количественной оценки вихрей.

На фиг. 3 приведены типичные фотографии вихрей на подветренной стороне конуса, помещенного в сверхзвуковой поток под углом атаки, число Маха потока равно двум. На фотографии отчетливо видны светлые полосы, идущие от передней части модели. Для того, чтобы идентифицировать эти полосы с вихревыми дорожками, были проведены контрольные эксперименты с моделями, покрытыми жидкой пленкой. Сравнение показало, что визуализируемая картина совпадает с действительной.

Преимуществом описанного способа визуализации является возможность наблюдать картину течения в областях, затененных различными частями модели, т. е. там,



Фиг. 3

где невозможно использовать теневой прибор. При визуальном наблюдении видна пространственная картина течения, которую можно зафиксировать с помощью стереосъемки. Кроме этого, данный способ визуализации позволяет наблюдать как присоединенные, так и оторвавшиеся от поверхности модели вихри, в то время как с помощью жидкой пленки можно наблюдать только следы присоединенных вихрей, которые исчезают в зоне отрыва. Если произвести фотографирование под разными углами по отношению к модели, можно оценить толщину вихря и расстояние, на которое он отрывается от поверхности модели.

В заключение авторы выражают благодарность А. В. Подмазову за помощь в проведении эксперимента.

Поступила 11 III 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Schumacher B. W., Gadamer E. O. Electron beam fluorescence probe for measuring the local gas density in a wide field of observation. «Canad. J. Phys.», 1958, vol. 36, No. 6.
2. Трохан А. М. Измерение параметров газовых потоков при помощи пучка быстрых электронов. ПМТФ, 1964, № 3, стр. 81.
3. Винклер Е. М. Методы, основанные на явлениях электрического разряда и послесвечения. Сб. Физические измерения в газовой динамике и при горении. М., Изд-во иностр. лит., 1957.
4. Vomburg H. I. A new glow — discharge new method for flow visualization in supersonic wind tunnels. J. Aero/Space Sci., 1958, vol. 25, No. 11.
5. Говен Ф. Е., Гопкинс В. Д. Аэродинамическая труба с электродуговым подогревателем воздуха, рассчитанная на получение скоростей в диапазоне чисел  $M$  от 10 до 20. Сб. Современная техника аэродинамических исследований при гиперзвуковых скоростях (под ред. А. М. Крилла), М., «Машгиз», 1965.
6. Столдер. Использование аэродинамических труб малой плотности в аэродинамических исследованиях. Сб. Газодинамика разреженных газов (под ред. М. Девиена), М., Изд-во иностр. лит., 1963.
7. Калугин В. М. Высокочувствительный способ тлеющего разряда для визуализации сверхзвуковых течений разреженного газа. ПМТФ, 1966, № 4.
8. Мессиг., Бархоп Е. Электронные и ионные столкновения. М., Изд-во иностр. лит., 1958.
9. Кишко С. М., Кучинка М. Ю. Функции возбуждения некоторых полос второй положительной системы. Оптика и спектроскопия, 1959, т. 6, вып. 5.
10. Калачев Б. В. Исследование импульсного разряда в потоке воздуха большой скорости, ЖЭТФ, 1963, т. 45, вып. 2 (8).
11. Алферов В. И., Бушмин А. С., Калачев Б. В. Экспериментальное исследование свойств электрического разряда в потоке воздуха. ЖЭТФ, 1966, т. 51, вып. 5 (11).

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЭЛЕКТРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

*Ю. В. Барышев, В. О. Герман, Б. В. Парфенов, Б. С. Соловьев*

(Москва)

Изучается прикатодное изменение потенциала в зависимости от силы тока, протекающего через газ, при различном содержании присадки в потоке, при некотором диапазоне температур рабочей поверхности электрода и различных материалах электрода. Рассматривается упрощенная модель с учетом возможности перенесения полученных результатов на натурную установку. Упрощение достигается исключением из рассмотрения магнитного поля и переходом к исследованию в режиме приложенного к электродам электрического поля.

*Установка.* Источником низкотемпературной воздушной плазмы служит плазмотрон постоянного тока мощностью 300 *квт* с газовой стабилизацией дуги [1]. Параметры газа на входе в рабочий канал: среднemasовая температура  $\sim 2400\text{--}2600^\circ\text{K}$ , скорость  $\sim 350\text{--}450$  *м/сек*, расход  $\sim 30\text{--}35$  *г/сек*.

Газ, выходящий из сопла плазмотрона, проходит через устройство для ввода присадки (концентрация калия  $\psi = 0\text{--}1.2\%$ ) и форкамеру. Форкамера служит для улучшения перемешивания присадки с потоком и формирует поток для входа в керамический неохлаждаемый канал 4 (фиг. 1) длиной 180 и сечением  $50 \times 18$  *мм*<sup>2</sup>, собранный из отдельных прямоугольных блоков. В боковые стенки канала вмонтированы электроды.

Температура  $T_w$  рабочей поверхности электрода непрерывно измеряется пирометром ТФПГ-1 и регистрируется на ЭПП-09. Спектральные характеристики фотодиода ( $\lambda_{eff} = 1.5$  *мк*) пирометра 6 подобраны таким образом, чтобы свести к минимуму влияние изучения присадки калия.