

УДК 629

## **О СВЕРХ- И ГИПЕРЗВУКОВОМ ДВИЖЕНИИ В АТМОСФЕРЕ БЕЗ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН**

*А. Ф. Александров, И. Б. Тимофеев, С. Н. Чувашев*

МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*В экспериментах по движению плазменных тел в атмосфере обнаружены режимы, при которых сильные ударные волны не регистрируются чувствительной аппаратурой. Это согласуется с выдвинутой авторами концепцией снижения лобового сопротивления.*

Проблема снижения любого сопротивления — одна из основных при организации сверхзвукового движения в атмосфере. При постоянной скорости полета на преодоление лобового сопротивления уходит основная часть затрат энергоресурсов летательного аппарата.

Традиционный подход к решению этой задачи состоит в придании телу оптимальной (стреловидной) формы. Однако возможности дальнейшей оптимизации в этом направлении уже фактически исчерпаны.

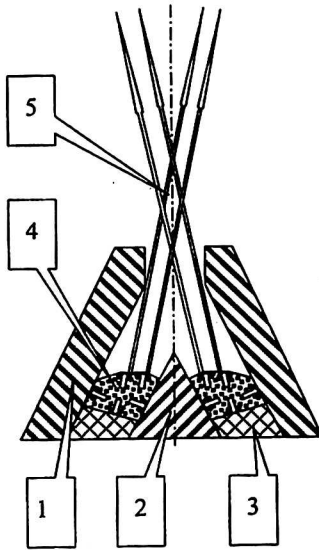
В [1] предложена концепция организации такого воздействия на газодинамику течения, при котором сильные ударные волны в воздухе не формируются. Это достигается формированием перед телом канала, движение в котором является локально-дозвуковым. Это должно привести к многократному снижению лобового сопротивления и значительному общему уменьшению энергозатрат на

сверхзвуковые полеты. Формулируются достаточные условия достижения безударного режима (достаточное удлинение зоны энерговклада, достаточная мощность, высокая скорость звука в канале и др.).

В данной работе представлены подтверждения основных положений этой концепции, полученные на основе экспериментов по инжекции в воздух высокоскоростных плазменных потоков.

При экспериментах по формированию в воздухе высокоскоростных плазменных потоков на основе разрядов в конических импульсных плазмотронах, подробно описанных в [2—4], обнаружены режимы, при которых выполнялись вышеуказанные достаточные условия устранения головной ударной волны.

Разряд (накопитель емкостью 144 мкФ, напряжение до 20 кВ) происходил внутри электродной системы конической геометрии (рис. 1). Диагностический комплекс обеспечивал визуализацию газодинамических разрывов с помощью шлирен-метода, покадровую и щелевую скоростную фоторегистрацию собственного излучения разряда, регистрацию тока и напряжения разряда и др.



*Рис. 1. Преобразование энергии по спектру и направлению и непрерывный оптический разряд при плазмодинамическом разряде в коническом плазмотроне:*

- 1, 2 — электроды;
- 3 — плазмообразующий диэлектрик;
- 4 — излучающий объем электроэрозионной плазмы;
- 5 — плазма непрерывного оптического разряда (стрелками показаны потоки энергии)

Экспериментальное и теоретическое исследование рабочих процессов [2—4] показало, что разряд представлял собой светоэрозионный плазмодинамический разряд с квазистационарным плазменным потоком, при котором под действием излучения разряда на элементы конструкции формируется сильноионизованная плотная плазма. Она непрерывно ускоряется собственными магнитными силами тока разряда. Формируемый плазменный поток содержит продукты эрозии диэлектрика (фторопласт), пары металла с конических стенок, аблирующих под действием мощного излучения плазмы, и газ (воздух), поступающий в поток вследствие перемешивания. В течение первого полупериода тока разряда электроразрядная плазма находится внутри электродной системы (эрозионный поток перемешивается с плотным воздухом, находящимся внутри, и вытесняет образующуюся газоплазменную пробку из межэлектродного объема). Когда же плазма выходит за срез плазмотрона, она взаимодействует не с плотным газом, а с областью нагретого воздуха.

Эта светящаяся область регистрируется за срезом сопла практически с начала энерговыклада, задолго до выхода электроразрядной плазмы. Причиной ее возникновения вблизи сопла плазмотрона является новое явление — непрерывный оптический разряд в атмосфере воздуха под действием мощного сфокусированного широкополосного теплового излучения. Это явление связано со следующим. Для плазодинамических разрядов в газах характерны относительно высокие температуры светоэрозионной плазмы (до 5—10 эВ, см. [5]), что предполагает тепловое излучение преимущественно в области вакуумного ультрафиолета, и высокий уровень давления (10—100 атм), что соответствует большим потокам излучения на стенки канала ( $10^7 \div 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) и соответственно малым потерям на теплопроводность. При исследуемых условиях разрядов в течение первого полупериода энерговыклада излучение может покидать систему только через сопло и только в полосе прозрачности воздуха (через окно прозрачности).

Таким образом, в рассматриваемой плазменной системе выполняются условия эффективного преобразования энергии ВУФ-излучения в окно прозрачности не только по спектру (как, например, при мощных взрывах, в излучающих разрядах и др.), но и по направлению. Причина этого преобразования заключается в том, что в радиационных волнах, формирующихся на границах плазменного объема с газом и парами стенок, энергия ВУФ-излучения поглощается, преобразуется во внутреннюю энергию образующейся плазмы и возвращается в излучающий объем (с потоком плазмы через его границы). В результате такого “квазиотражения” энергии ВУФ-излучения многократно увеличивается мощность излучения, выходящего из плазмы через окно прозрачности. Соответствующие потоки энергии в системе схематически изображены на рис. 1. Видно, что тепловое излучение фокусируется в области за срезом сопла электродной системы (некоторую роль в данном случае играет также отражение от металлических стенок). Световые потоки в зоне фокусировки за соплом достигают  $(1-3) \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>. Плазма оптического разряда образуется в зоне фокусировки преобразованного излучения за срезом электродов практически с самого начала разряда (когда мощность энерговыклада  $P$  не превышала  $10^8$  Вт) и наблюдается вплоть до выхода электроразрядной эрозионной плазмы. Температура плазмы оптического разряда соответствует  $T \cong 18-20$  кК. В результате задолго до выхода электроразрядной плазмы у среза электродной системы наблюдается (относительно плотной эрозионной плазмы) слабосветящееся стационарное плазменное образование, не меняющее размера и очертаний, но излучательная способность которого растет примерно пропорционально мощности выходящего из электродной системы излучения электроразрядной плазмы. По форме плазма непрерывного оптического разряда соответствует области фокусировки излучения электроразрядной плазмы.

При формировании плазмы непрерывного оптического разряда ударно-волновой структуры не наблюдалось. И это неудивительно: плазменный объем имеет форму, близкую к цилиндрической при характерных радиальных размерах плазмы оптического разряда  $r = 3$  мм, для расширения такого объема скорость радиального течения была бы близка к скорости звука в воздухе при характерном критическом времени прогрева 5 нс, что значительно меньше характерного времени нарастания мощности энерговыклада и мощности излучения электрораз-

рядной плазмы (20—30 мкс), т. е. локальные значения числа Маха при прогреве газа намного меньше единицы.

Не регистрировались сильные ударные волны и в начальной стадии истечения электроэрозионной плазмы из плазмотрона, пока она двигалась по области, занятой плазмой непрерывного оптического разряда: при характерной температуре в этой области  $T \cong 20$  кК скорость фронта плазменного потока оказывалась меньше локальной скорости звука. Но после того как электроэрозионный плазмоид проходил эту область, он взаимодействовал с относительно холодным плотным воздухом, что во всех случаях сопровождалось формированием очень хорошо регистрируемых сильных ударных волн, а также скачкообразным уменьшением скорости движения плазмоида на 30—50 % — вследствие резкого увеличения лобового сопротивления при переходе к обычному режиму сверхзвукового движения тела в холодном воздухе (рис. 2, а—е).

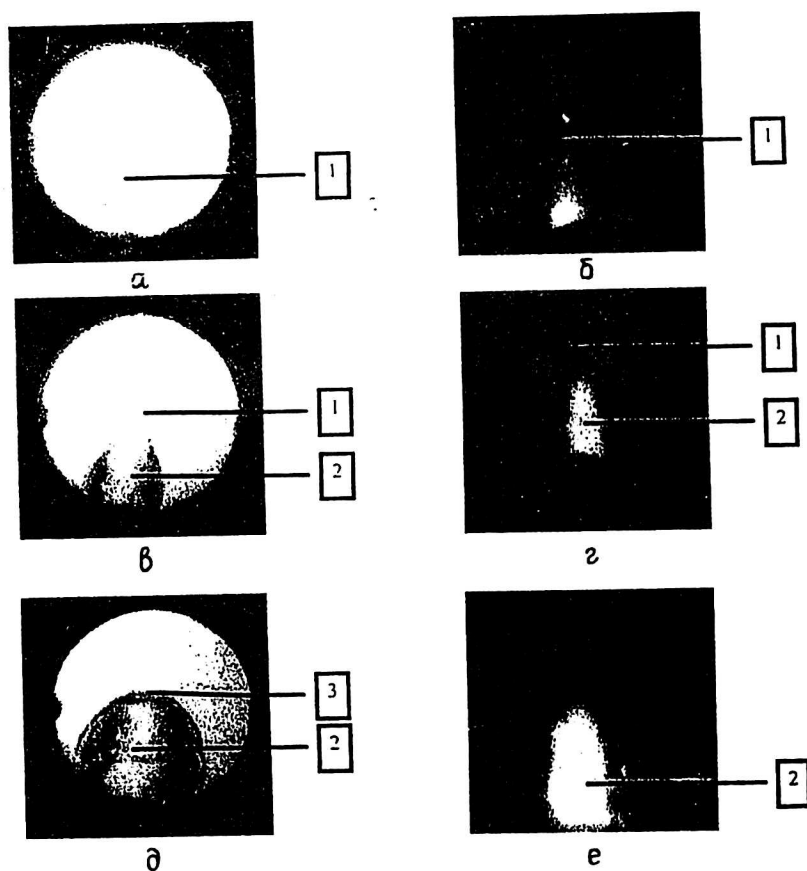


Рис. 2. Теневые фотографии (а, в, д) и кадры скоростной фотосъемки (б, г, е) в стадиях формирования канала (а, б), прохода тела по плазменному каналу (в, г) и по газу за каналом (д, е): 1 — плазменный канал; 2 — плазменное тело; 3 — ударная волна

Следует отметить, что в сильноионизованной плазме с давлением порядка атмосферного ударные волны, движущиеся со скоростями порядка 1—10 км/с, обычно хорошо регистрируются теневыми методами [6].

Таким образом, в ходе формирования удлиненного плазменного канала и в течение высокоскоростного движения плазменного тела в атмосфере при выполнении условий реализации безударного режима применявшаяся достаточно чувствительная диагностическая методика не регистрировала ударно-волновых фронтов. Экспериментально фактически зарегистрировано движение в атмосфере фронта плазменного тела со скоростями порядка 3 км/с, т. е. в 10 раз выше скорости звука в воздухе, без формирования сильных ударных волн. Это является подтверждением концепции, изложенной в [1].

### Л и т е р а т у р а

1. Александров А. Ф., Тимофеев И. Б., Чувашев С. Н. Безударное сверхзвуковое движение в атмосфере: принципиальная возможность и практическая реализация // Прикладная физика. 1996. № 3. Р. 112—117.
2. Скоростные плазменные струи в воздухе. 1. Динамика импульсной струи, генерируемой кумулятивным плазмотроном с конической геометрией / А. П. Ершов, И. Х. Имад, И. Б. Тимофеев и др. // ТВТ. 1993. Т. 31. № 3. С. 364—368.
3. Скоростные плазменные струи в воздухе. 2. Параметры импульсной плазменной струи, инжектируемой кумулятивным плазмотроном с конической геометрией / А. П. Ершов, И. Х. Имад, И. Б. Тимофеев и др. // Там же. № 4. С. 531—534.
4. Скоростные плазменные струи в воздухе. 3. Нелазерный непрерывный оптический разряд в воздухе / А. Ф. Александров, А. П. Ершов, И. Б. Тимофеев и др. // Там же. № 5. С. 850—851.
5. Эффект турбулентной модификации и транспортные свойства плазмодинамических разрядов в вакуумном ультрафиолетовом излучении / Ю. С. Протасов, С. Н. Чувашев, Т. С. Щепанюк, М. В. Кутырев // Там же. 1992. Т. 30. № 2. С. 244—249.
6. Протасов Ю. С., Чувашев С. Н., Щепанюк Т. С. Экспериментальное исследование внутренней структуры излучающих плазмодинамических МПК-разрядов в газах // Там же. 1990. Т. 28. № 3. С. 444—454.

## ON SUPER- AND HYPERSONIC PROPAGATION IN THE ATMOSPHERE WITHOUT FORMATION OF STRONG SHOCK WAVES

*A. F. Alexandrov, I. B. Timofeev, S. N. Chuvashov*

*At experiments with movement of plasma bodies in the atmosphere, regimes have been found, at which no strong shock waves are registered by a sensitive diagnostic set up. It corresponds with a concept of drag reduction, that had been recently suggested by the authors.*