

03:04:07

Исследование оптического пробоя в сверхзвуковой струе воздуха

© А.М. Малов, А.Н. Оришич

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, Новосибирск
E-mail: malex@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 15 августа 2011 г.

Описаны результаты исследования характеристик свободной сверхзвуковой струи диаметром 10 мм в режиме чисел Маха 1.7–3.7 с подводом энергии от оптического пульсирующего разряда, создаваемого импульсно-периодическим CO₂-лазером с механической модуляцией добротности. Исследованы значения коэффициента поглощения лазерного излучения в плазме оптического пробоя сверхзвукового потока воздуха и получены значения этого параметра вплоть до 60%. Впервые показано, что пороговая плотность воздуха, соответствующая резкому нарастанию эффективности поглощения, равна 1.8–2 kg/m³ и не зависит от числа Маха. Приведены распределения газодинамических параметров в сверхзвуковой струе (динамического напора и температуры) с энергоподводом от плазмы оптического разряда.

Создание мощных лазеров, работающих в импульсно-периодическом режиме с частотами до 100 kHz и импульсной мощностью, существенно (~ 100 раз) превышающей среднюю, позволяет значительно расширить область применения лазерного излучения, увеличить эффективность его использования и реализовать качественно новые эффекты. Одним из перспективных направлений исследования является применение лазерного излучения для воздействия на сверхзвуковой поток газа, в частности для аэрокосмических приложений [1]. Ввод энергии лазерного излучения в газовый поток возможен с применением оптического разряда. Выполненные работы (см., например, [2]) показали, что использование непрерывного лазерного излучения для формирования оптического разряда возможно только при скоростях газа не более нескольких десятков метров в секунду. В работе [3] был получен оптический пульсирующий разряд (ОПР), который зажигался в фокусе луча импульсно-периодического CO₂-лазера в сверхзвуковой струе аргона. Однако кинетические процессы в плазме инертного газа

(аргона) принципиально отличаются от процессов в воздухе. В частности, приблизительно в десять раз возрастает пороговая интенсивность мощности формирования разряда. Другим важным требованием к такому лазеру является высокое качество излучения, так как лазерный пучок должен фокусироваться в компактное пятно малых размеров. Причем формирование лазерной моды должно происходить достаточно быстро — за время нарастания фронта гигантского импульса. Поэтому исследование оптического разряда в сверхзвуковом потоке воздуха ранее не проводилось. Создание нами импульсно-периодического лазера с необходимыми параметрами [4] открыло перспективу формирования оптического разряда в сверхзвуковых потоках воздуха для проведения опытов в реальных аэродинамических сверхзвуковых трубах в воздухе при числе Маха $M > 1$ [5].

Целью настоящей работы являлось получение ОПР в сверхзвуковом потоке воздуха, изучение эффективности поглощения энергии лазерного излучения в плазме и определение влияния числа Маха на коэффициент поглощения, изучение воздействия ОПР на параметры торможения потока.

Оптический разряд в сверхзвуковом потоке воздуха формировался с помощью импульсно-периодического CO_2 -лазера с механической модуляцией добротности со средней мощностью генерации до 4.5 kW, частотой следования импульсов до 80 kHz и импульсной мощностью до 200 kW [5].

Модельный сверхзвуковой поток создавался на стенде, состоящем из подводящего трубопровода ($d_y = 15 \text{ mm}$), соединенного гибким шлангом с форкамерой и коническим соплом. Полное давление потока измерялось в форкамере. Эксперименты выполнялись при максимальном уровне давления в форкамере — 1.8 МПа. Коническое сопло с углом раскрытия 13° при диаметре среза 10 mm и диаметре критического сечения 8 mm соответствовало геометрическому числу Маха 1.9. При этом расход газа составляет 2–4 kg/s.

Измерялось среднее значение мощности излучения на выходе из лазера и после прохождения зоны оптического разряда стационарным калориметрическим измерителем NOVA 2 с пределом измеряемой средней мощности до 5 kW. Визуализация структуры сверхзвукового течения в воздухе производилась с использованием теневых и шлирен-фотографий. Динамический напор измерялся стандартной трубкой Пито. Температура торможения — термпарой.

Значения газодинамических параметров сверхзвуковой струи на разных расстояниях от среза сопла и коэффициента поглощения плазмой оптического разряда излучения CO₂-лазера

1.5 МПа					1.15 МПа					0.8 МПа				
X, mm	ρ , kg/m ³	M	V, m/s	K_{ab} , %	X, mm	ρ , kg/m ³	M	V, m/s	K_{ab} , %	X, mm	ρ , kg/m ³	M	V, m/s	K_{ab} , %
3	4.95	1.85	486	43.8	4.5	3.47	1.95	502	55	3	2.7	1.85	487	47.7
3.5	4.72	1.92	497	55.6	6	3.1	2.05	516	55.3	4	2.5	1.92	497	45.5
5	4.18	1.99	508	59.8	7	2.87	2.12	525	56.7	5	2.31	1.99	507	47.1
7	3.62	2.12	532	57.7	8	2.7	2.18	533	48.3	6	2.16	2.05	516	46.1
9	3.17	2.24	540	54.6	12	2.05	2.42	561	13.8	7	2	2.12	525	46.8
11	2.77	2.36	555	45.1						8	1.87	2.18	533	49
13	2.1	2.61	580	17						9	1.75	2.24	540	41.4
15	1.43	2.96	609	13.8						10	1.63	2.3	547	29.1
20	0.66	3.71	654	11.7						11	1.53	2.36	554	21.8

На рис. 1, *a* приведена фотография внешнего вида рабочей зоны установки с оптическим разрядом в сверхзвуковом потоке воздуха. На фото наблюдается шарообразное свечение плазмы оптического разряда и тепловой след шириной около 5 мм и длиной 3–4 см.

Теневая фотография течения при давлении в форкамере 1.5 МПа приведена на рис. 1, *b*. Измерения поглощения производились в пределах так называемой „первой бочки“ сверхзвуковой струи вдоль ее оси на разных расстояниях от среза сопла. Структура течения при наличии оптического пробоя показана на рис. 1, *c*. В потоке позади зоны оптического пробоя наблюдается разрушение характерной „бочкообразной“ структуры сверхзвукового течения.

Параметры потока в струе при истечении ее в окружающую атмосферу определялись численно с помощью программного комплекса FLUENT в рамках уравнений Навье–Стокса. Возможности численного моделирования и сравнение его с экспериментальными исследованиями детально обсуждалось в литературе (см., например, [6]). В таблице приведены рассчитанные величины плотности ρ , числа Маха M и скорости V вдоль оси потока на различных расстояниях от среза сопла. В этой же таблице приведены значения коэффициента поглощения K_{ab} лазерного излучения, измеренные в различных точках по оси струи.

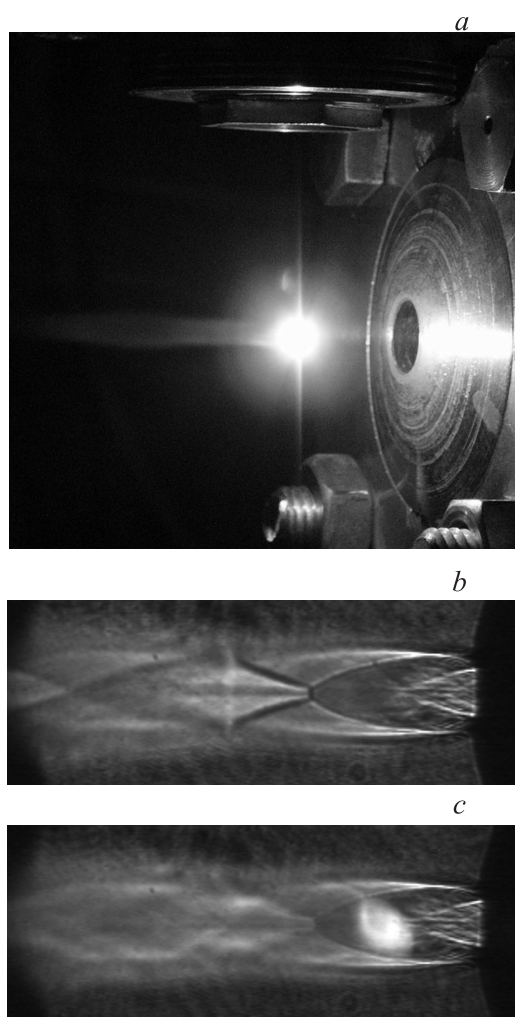


Рис. 1. *a* — фотография внешнего вида рабочей зоны установки с оптическим разрядом в сверхзвуковом потоке воздуха; *b*, *c* — теньевая фотография сверхзвуковой струи при отсутствии и при наличии оптического пробоя соответственно.

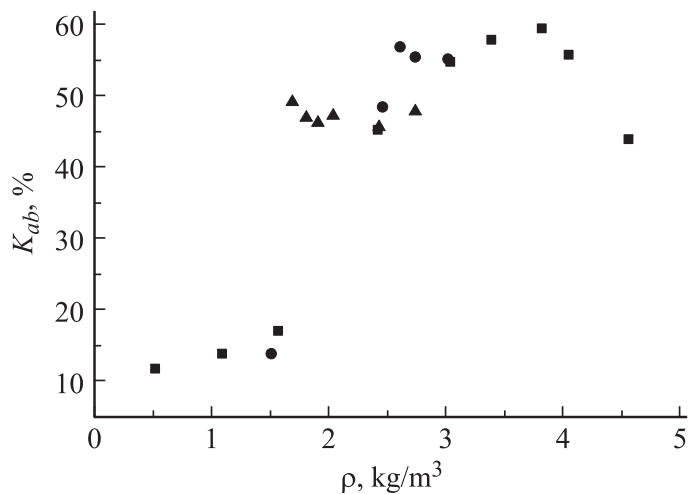


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения лазерного излучения в плазме оптического разряда от плотности воздуха при давлении в форкамере (■ — 1.5 МПа, ● — 1.15 МПа, ▲ — 0.8 МПа).

На рис. 2 данные таблицы перестроены в виде зависимости коэффициента поглощения (K_{ab}) от плотности газа (ρ). Приведенные данные позволяют сделать вывод о том, что имеется диапазон плотности газа, а точнее сказать, есть некоторая минимальная плотность воздуха, после достижения которой наблюдается эффективное поглощение лазерной энергии в плазме оптического пробоя в сверхзвуковом потоке воздуха. Это значение в нашем случае составляет $1.8\text{--}2\text{ kg/m}^3$ или концентрацию 10^{19} cm^{-3} . Важно отметить, что критическое значение плотности не зависит от режима формирования потока в интервале давления в форкамере 0.8–1.5 МПа. Несмотря на большую скорость газа (от 500 до 650 м/с) и чисел Маха (1.8–3.7), можно полагать, что во всем диапазоне выполненных измерений эффективность поглощения энергии определяется в основном плотностью воздуха. При заданной средней мощности и длине волны излучения (в нашем случае — $10.6\text{ }\mu\text{m}$) существует минимальная величина плотности сверхзвукового воздушного

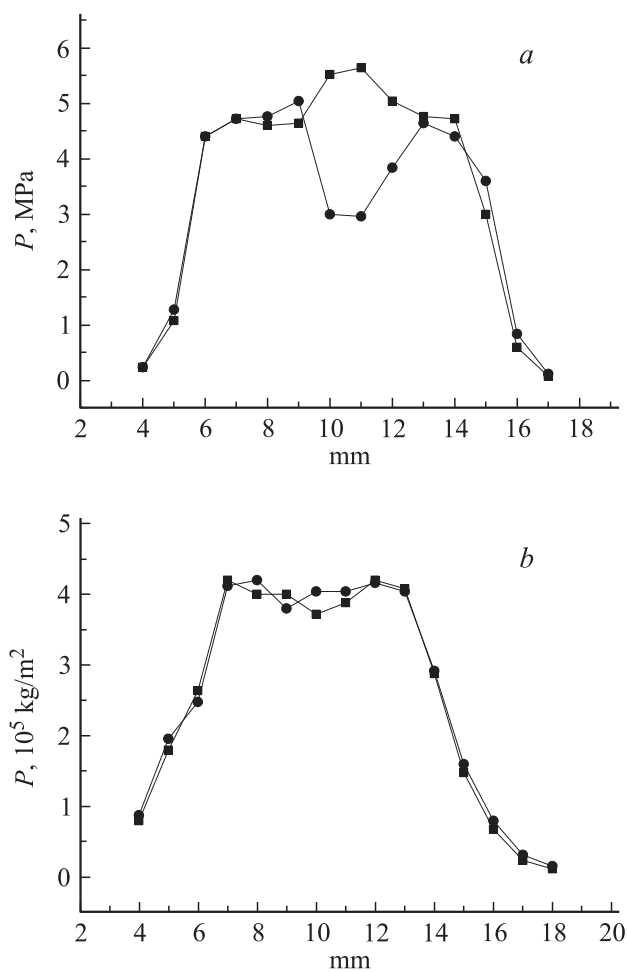


Рис. 3. Зависимость динамического напора в сверхзвуковой струе воздуха от координаты поперек струи (● — при наличии оптического пробоя, ■ — при отсутствии оптического пробоя); *a* — на расстоянии 4 mm от плазмоида, *b* — на расстоянии 40 mm от плазмоида.

потока, при которой реализуется максимальное поглощение энергии в плазме оптического пробоя.

Были выполнены измерения параметров струи в тепловом следе после плазмоида. На рис. 3, *a, b* приведены измерения динамического напора (P) поперек струи на двух разных расстояниях от плазменного образования.

Характерная особенность графика, приведенного на рис. 3, *a*, заключается в наличии в середине струи четырехмиллиметрового провала, более чем на $1/3$ от общего динамического напора для потока в непосредственной близости (4 mm) от зоны оптического разряда. На большем расстоянии (40 mm от плазмы) установлено, что провал сглаживается, при этом общий динамический напор в середине струи уменьшается. Нами выполнены измерения температуры вдоль осевой линии струи при включении оптического разряда. Конструкция термопары обеспечивала измерение температуры торможения в потоке. Получена плавно снижающаяся зависимость температуры от расстояния со значениями температуры — $\Delta T \approx 95^\circ\text{C}$ вблизи плазмоида (4 mm) и $\sim 30^\circ$ вдали от плазмоида (40 mm). Оценка повышения температуры в тепловом следе после энергоподвода в сверхзвуковой поток, проведенная с учетом трехмерного характера течения струи, величины расхода воздуха, протекающего через зону энерговыделения, теплофизических характеристик воздуха, хорошо соответствует значениям поглощенной энергии.

Таким образом:

1. Впервые получен ОНР в сверхзвуковом потоке воздуха и исследованы значения коэффициента поглощения CO_2 — лазерного излучения в плазме оптического пробоя в широком диапазоне газодинамических параметров. Показана возможность поглощения до 60% средней мощности CO_2 -лазера, работающего в импульсно-периодическом режиме с частотой до 80 kHz.

2. Впервые показано, что пороговая плотность воздуха в сверхзвуковом потоке, соответствующая резкому нарастанию эффективности поглощения, равна $1.8\text{--}2\text{ kg/m}^3$ и не зависит от числа Маха в диапазоне 1.7–3.7.

3. Исследованы распределения газодинамических параметров в сверхзвуковой струе (динамического напора и температуры) с энергоподводом от плазмы оптического разряда, создаваемого излучением мощного CO_2 -лазера с механической модуляцией добротности и получены значения плотности, скорости и температуры в тепловом следе.

Результаты работы позволяют определить параметры сверхзвукового течения, обеспечивающего высокие уровни энерговклада в поток и, как следствие, возможность управления структурой такого потока.

Список литературы

- [1] Тищенко В.Н., Гулидов А.И. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 19. С. 77.
- [2] Генералов Н.А., Зимаков В.П., Козлов Г.И., Масюков В.А., Райзер Ю.П. // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11. № 9. С. 447.
- [3] Третьяков П.К., Грачев Г.Н., Иванченко А.И., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. // Докл. РАН. 1994. Т. 336. № 4. С. 466–467.
- [4] Malov A.N., Orishich A.M., Shulyatyev V.B. // Proc. of SPIE. Lisbon, Portugal. 2008. V. 7131. P. 71311P1–71311P7.
- [5] Малов А.Н., Оришич А.М., Фомин В.М., Внучков Д.А., Наливайченко Д.Г., Чиркашенко В.Ф. // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 4. С. 155–160.
- [6] Запрягаев В.И., Киселев Н.П. // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50. № 2. С. 104–111.