

УДК 535.215

Исследование оптического разряда и поглощения энергии мощного импульсно-периодического СО₂-лазера в сверхзвуковой струе воздуха

А.Н. Малов, А.М. Оришич, Т.А. Бобарькина, В.Ф. Чиркашенко*

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1*

Поступила в редакцию 15.10.2011 г.

Приведены результаты исследования оптического разряда и поглощения излучения СО₂-лазера в плазме оптического разряда в сверхзвуковой струе воздуха в режиме чисел Маха 1,7–3,7. Впервые получены количественные экспериментальные данные о динамике поглощения излучения в образующейся лазерной плазме в широком диапазоне газодинамических параметров сверхзвукового потока воздуха (скорость, статическое давление, плотность, число Маха). Показано, что пороговая плотность воздуха в сверхзвуковом потоке, соответствующая резкому нарастанию эффективности поглощения, равна 1,8–2 кг/м³. Измерен коэффициент поглощения лазерного излучения в плазме оптического пробоя при сверхзвуковом потоке воздуха в широком диапазоне газодинамических параметров. Максимальная величина коэффициента поглощения достигает 60%. Приведены распределения газодинамических параметров в сверхзвуковой струе (динамического напора и температуры) с энергоподводом от плазмы оптического разряда. Полученные результаты позволяют определить параметры сверхзвукового течения, обеспечивающего высокие уровни энерговысвобождения в поток и, как следствие, возможность управления структурой такого потока.

Ключевые слова: мощный импульсно-периодический СО₂-лазер, механическая модуляция добротности, сверхзвуковой поток воздуха, оптический пробой воздуха, коэффициент поглощения плазмы, динамический напор, температура теплового слоя; high-power pulse-periodic CO₂-laser, mechanical Q-switching, the supersonic flow of air, the optical breakdown of air, the absorption coefficient of the plasma, dynamic pressure, the temperature of the thermal layer.

Введение

В рамках фундаментальной проблемы взаимодействия мощного лазерного излучения с атмосферным воздухом важную роль играют исследования влияния движения газа на образование оптического разряда и поглощение энергии в нем. Перспективным направлением исследований является применение лазерного излучения для воздействия на сверхзвуковой поток газа [1, 2], в том числе для аэрокосмических приложений [3, 4]. Ввод лазерного излучения в газовый поток возможен с применением непрерывного оптического разряда (НОР) [5]. Однако выполненные работы показали, что такой разряд не может быть сформирован при скоростях более нескольких десятков метров в секунду [6, 7].

Создание мощных лазеров, работающих в импульсно-периодическом режиме с частотами следования импульсов до 100 кГц и импульсной мощностью, существенно (~ 100 раз) превышающей среднюю, поз-

воляет значительно расширить область применения лазерного излучения, увеличить эффективность его использования и реализовать качественно новые эффекты. В работе [2] сообщается об оптическом пульсирующем разряде (ОПР), который зажегся в фокусе луча импульсно-периодического СО₂-лазера в сверхзвуковой струе аргона. Влияние такого разряда на поток аналогично воздействию НОР. Для создания ОПР в сверхзвуковых потоках воздуха при проведении опытов в реальных аэродинамических сверхзвуковых трубах необходимы мощности излучения, на порядок превышающие мощность лазера, используемого в экспериментах с аргоном. При этом должны быть достигнуты качество излучения, близкое к ТЕМ₀₀-моду на уровне мощности 5–10 кВт, и высокая скорость нарастания интенсивности излучения в пике за время порядка 10–30 нс.

Для достижения столь жестких требований перспективным представляется метод создания импульсно-периодического режима генерации СО₂-лазера, основанный на использовании самофильтрующего резонатора (СФР) [8]. СФР [9, 10] представляет собой конфокальный резонатор из двух софокусных сферических зеркал разной кривизны, в общей фокальной плоскости которых расположено кольцевое выходное зеркало с отверстием связи. Из-за высокой степени

* Алексей Николаевич Малов (malex@itam.nsc.ru); Анатолий Митрофанович Оришич (laser@itam.nsc.ru); Татьяна Александровна Бобарькина (elka_x@ngs.ru); Владимир Федорович Чиркашенко (chirkash@itam.nsc.ru).

дискриминации высших мод по потерям в резонаторе надежно выделяется низшая мода. В [8] блок модуляции, собранный на основе сферических зеркал и вращающегося диска, и сферическое зеркало резонатора находятся вне лазера. Получен стабильный импульсно-периодический режим генерации на уровне средней мощности до 3 кВт.

Мы использовали новый способ организации импульсно-периодического режима генерации CO_2 -лазера со СФР, основанный на применении во внутрирезонаторном модуляторе двух вогнутых цилиндрических зеркал равной кривизны. Это позволило снизить время включения добротности, или время открывания луча затвором, и получить мощный лидирующий пик в импульсе излучения при уровне средней мощности до 5 кВт без какого-либо воздействия излучения на диафрагму модулятора. В работе [11] нами показана перспективность созданного источника излучения для зажигания ОПР в сверхзвуковом потоке воздуха.

Цель настоящей работы заключалась в получении ОПР в сверхзвуковом потоке воздуха в широком диапазоне газодинамических параметров сверхзвукового потока воздуха (скорость, статическое давление, плотность, число Маха), изучении эффективности поглощения энергии лазерного излучения в плазме и определении влияния числа Маха на коэффициент поглощения, а также в изучении воздействия ОПР на параметры торможения потока.

Экспериментальная установка и методы измерения

Оптический разряд в сверхзвуковом потоке воздуха формировался с помощью импульсно-периодического CO_2 -лазера с механической модуляцией добротности, созданного на основе мощного непрерывного CO_2 -лазера с конвективным охлаждением рабочей среды [12]. Размер активной среды в этом случае составлял $2 \times 100 \times 8 \times 10$ см (использована «двухэтажная» система возбуждения с межэлектродным расстоянием 8 см, длиной активной среды 100 см и размером вдоль потока ~ 10 см). Для обеспечения эффективного съема энергии в лазере применялся многопроходный резонатор с числом проходов 8 и суммарной длиной резонатора 12 м. Лазер обеспечивал работу с частотой следования импульсов до 80 кГц, средней мощностью 4,5 кВт и импульсной мощностью до 200 кВт [13].

Моделльный сверхзвуковой поток создавался на стенде, состоящем из подводящего трубопровода ($d_y = 15$ мм), 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 мм и диаметре критического сечения 8 мм соответствовало геометрическому числу Маха 1,9. При этом расход газа составлял 2–4 кг/с.

На рис. 1 представлен внешний вид рабочей зоны установки.

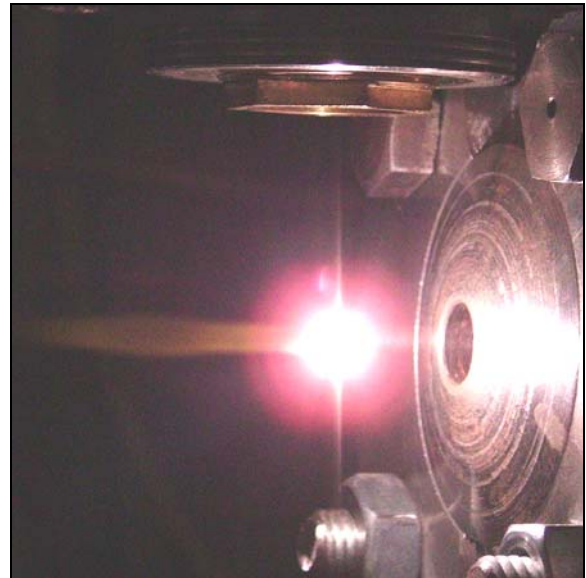


Рис. 1. Внешний вид рабочей зоны установки с оптическим разрядом в сверхзвуковом потоке воздуха

Видны шарообразное свечение плазмы оптического разряда и тепловой след шириной около 5 мм и длиной 3–4 см.

Для проведения визуальных наблюдений процесса формирования плазмы в сверхзвуковом потоке и создаваемого ею теплового следа установка оснащена системой оптической диагностики. Система включает оптическую приставку к теневым приборам на базе адаптивных визуализирующих транспарантов, разработанных в ИТПМ СО РАН [14] в комплекте с коллиматором на базе телескопов ТАЛ-100R, и скоростную видеокамеру с временем экспозиции ~ 1 мс. Применяемый источник света — непрерывный лазер с диодной накачкой с длиной волны 532 нм.

Излучение лазера через линзу из материала ZnSe с фокусным расстоянием 63 мм поступало на осевую линию сверхзвуковой струи перпендикулярно потоку газа. Диаметр пятна в фокусе линзы составлял 100–150 мкм, что обеспечивало интенсивность импульсной мощности в оптимальном режиме работы лазера $(7-15) \cdot 10^8$ Вт/см². Лазерное излучение на выходе из струи и зоны плазмообразования поглощалось калориметрическим измерителем мощности NOVA-2 с пределом измеряемой мощности до 5 кВт. Динамический напор измерялся стандартной трубкой Пито, температура торможения — термпарой.

Исследование временных характеристик процессов оптического пробоя воздуха выполнялось осциллографическим методом с использованием фотодиода ФСГ 22-3А1 для контроля временной формы падающего и прошедшего через плазму лазерного излучения. С помощью вакуумного фотоэлемента ФЭК-22 выполнялись измерения свечения плазмы оптического пробоя.

Экспериментальные результаты

Теневая картина сверхзвукового течения струи при давлении в форкамере 1,5 МПа показана на рис. 2, а.

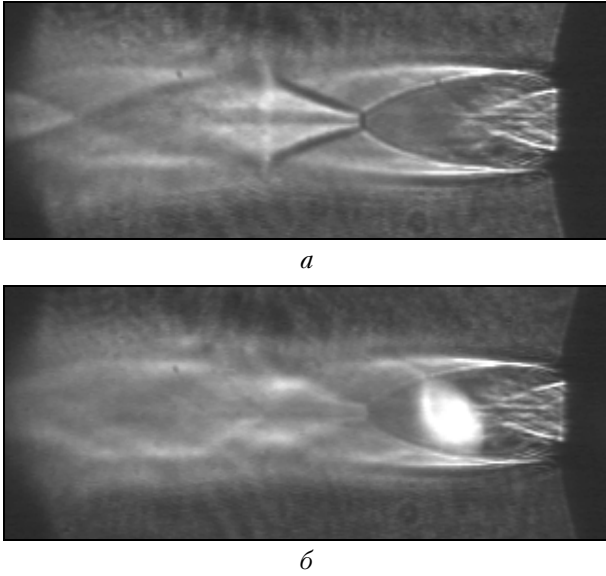


Рис. 2. Сверхзвуковая струя при отсутствии (а) и при наличии оптического пробоя (б). На рисунке 8 мм соответствуют 1 см

Видна характерная для сверхзвуковой струи структура. 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. 2, б. В потоке позади зоны оптического пробоя наблюдается разрушение характерной «бочкообразной» структуры сверхзвукового течения.

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

X, мм	ρ, кг/м ³	M	V, м/с	K _{ab} , %
1,5 МПа				
3	4,95	1,85	486	43,8
3,5	4,72	1,92	497	55,6
5	4,18	1,99	508	59,8
7	3,62	2,12	532	57,7
9	3,17	2,24	540	54,6
11	2,77	2,36	555	45,1
13	2,1	2,61	580	17
15	1,43	2,96	609	13,8
20	0,66	3,71	654	11,7
1,15 МПа				
4,5	3,47	1,95	502	55
6	3,1	2,05	516	55,3
7	2,87	2,12	525	56,7
8	2,7	2,18	533	48,3
12	2,05	2,42	561	13,8
0,8 МПа				
3	2,7	1,85	487	47,7
4	2,5	1,92	497	45,5
5	2,31	1,99	507	47,1
6	2,16	2,05	516	46,1
7	2	2,12	525	46,8
8	1,87	2,18	533	49
9	1,75	2,24	540	41,4
10	1,63	2,3	547	29,1
11	1,53	2,36	554	21,8

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 обсуждались в литературе (см., например, [15]). В таблице приведены рассчитанные значения плотности ρ, числа Маха M и скорости V вдоль оси потока на различных расстояниях X от среза сопла, а также измеренные значения коэффициента поглощения K_{ab} лазерного излучения, полученные в различных точках X по оси струи.

Поглощение излучения CO₂-лазера в плазме оптического разряда может быть оценено с использованием комплексной диэлектрической проницаемости

$$\epsilon' = \epsilon + i\sigma,$$

где

$$\epsilon(\omega) = 1 + \frac{\omega_p^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \nu^2\omega^2};$$

$$\sigma(\omega) = \frac{\omega_p^2\nu\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \nu^2\omega^2}, \quad \omega_p^2 = \frac{4\pi e^2 N_e}{m}$$

– плазменная частота; ω₀ – характерная резонансная частота; N_e – электронная концентрация. При условии свободных электронов ω₀ = 0 и ω ≫ ν получим

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad \text{и} \quad \sigma(\omega) = \frac{\omega_p^2\nu\omega}{\omega_0^4} = \frac{4\pi e^2}{m\omega_0^4} N_e\nu\omega,$$

т.е. поглощение нарастает с увеличением концентрации электронов. Однако излучение проникает в плазму при условии ω_p²/ω² ≤ 1. Таким образом, при заданной частоте лазера ω проникновение излучения в плазму ограничено условием 4πe²N_e/(mω²) ≈ 1 для ω = 2π/λ и CO₂-лазера для λ = 10,6 мкм при N_e ~ 10¹⁹ см⁻³. Согласно данным [16], необходимые параметры плазмы N_e ~ 10¹⁹ см⁻³ для неподвижного воздуха могут быть получены при плотности мощности 5 · 10⁸ Вт/см² и концентрации молекул около 3 · 10¹⁹ частиц/см³. Такие значения N_e ~ 10¹⁹ см⁻³ предполагают работу при давлении газа порядка атмосферного и более, так как трудно обеспечить степень ионизации в плазме оптического разряда, близкую к 100%.

На рис. 3 приведены осциллограммы падающего и прошедшего лазерного излучения, а также свечения плазмы в сверхзвуковом потоке воздуха.

Видно, что на фронте мощного лазерного импульса за время 50–70 нс от его начала наблюдаются пробы газа и появление свечения плазмы. При этом начинается эффективное поглощение лазерного излучения, сопровождающееся значительным снижением интенсивности (см. осциллограмму 2 на рис. 3 прошедшего излучения). Интересно, что интегральное свечение ОПР носит немонотонный характер, т.е. имеет два максимума, которые обусловлены, по-видимому, динамикой искры и изменением условий распространения света, т.е. просветлением плазмы.

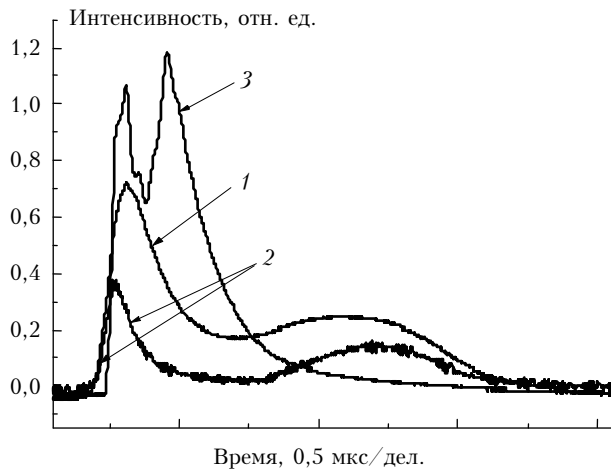


Рис. 3. Осциллограммы прошедшего (1), падающего (2) лазерного излучения и свечения плазмы (3) в сверхзвуковом потоке воздуха

Выполненные нами [11] экспериментальные исследования дистанционного ввода энергии лазерного излучения в сверхзвуковой поток воздуха в условиях реальной аэродинамической установки продемонстрировали невысокое (менее 30%) поглощение лазерной энергии в потоке [11, 13]. В условиях экспериментов [11] статическое давление газа и плотность его составляли 0,03 МПа и 1,44 кг/м³ соответственно.

На рис. 4 приведены зависимости коэффициента поглощения K_{ab} от плотности газа ρ .

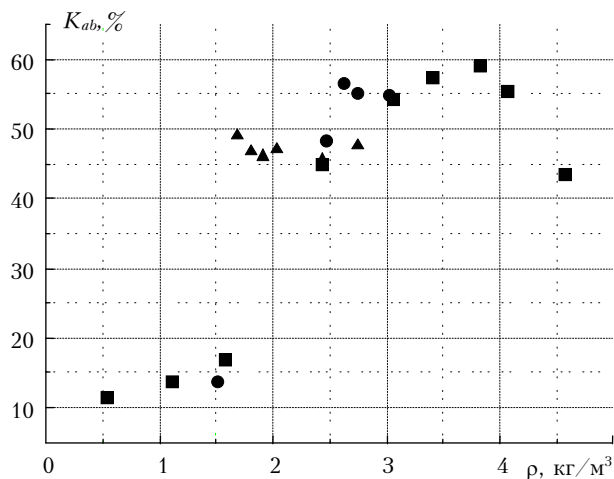


Рис. 4. Зависимость коэффициента поглощения лазерного излучения в плазме оптического разряда от плотности газа при давлении в форкамере (■ – 1,5 МПа, ● – 1,15 МПа, ▲ – 0,8 МПа)

Они позволяют сделать вывод о том, что имеется диапазон плотности газа, или, 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 1,8–2 кг/м³ или концентрацию $N_e \sim 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Такая концентрация мо-

лекул воздуха в сверхзвуковом потоке обеспечивает при 30%-й ионизации значение критической плотности электронов при частоте излучения СО₂-лазера для неподвижного газа [14]. 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 V (от 500 до 650 м/с) и чисел Маха M (1,8–3,7), можно полагать, что во всем диапазоне выполненных измерений эффективность поглощения энергии определяется в основном только плотностью воздуха. То есть при заданной средней мощности и длине волны излучения (в нашем случае – 10,6 мкм) существует минимальная величина плотности сверхзвукового воздушного потока, при которой реализуется максимальное поглощение энергии в плазме оптического пробоя.

Были выполнены измерения параметров струи в тепловом следе после плазмоида. Так, на рис. 5

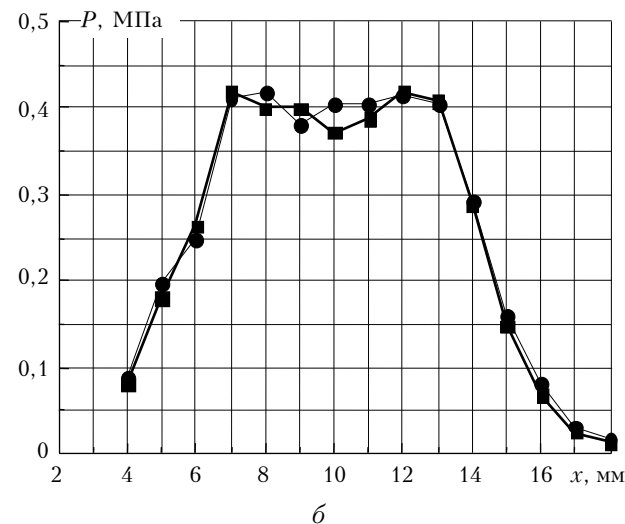
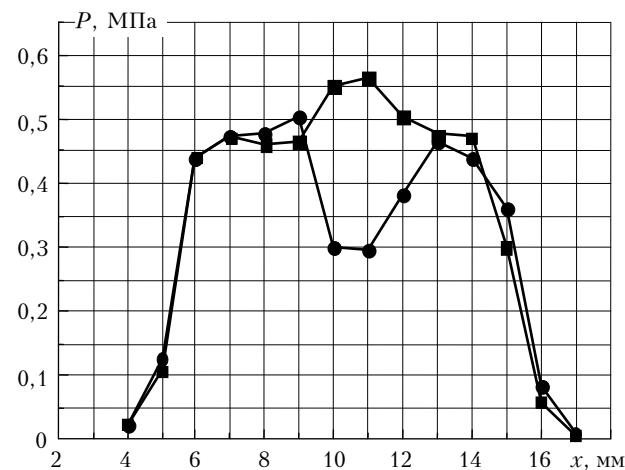


Рис. 5. Зависимость динамического напора в сверхзвуковой струе воздуха от координаты поперек струи x : а – на расстоянии 4 мм от плазмоида (● – при наличии оптического пробоя, ■ – в его отсутствие); б – на расстоянии 40 мм от плазмоида (● – при наличии оптического пробоя, ■ – в его отсутствие)

приведены измерения динамического напора P поперек струи на двух разных расстояниях от точки фокусирования лазерного луча.

На рис. 5, a в середине кривой (середина струи) виден 4-мм провал более чем на $1/3$ от общего динамического напора для потока в непосредственной близости (4 мм) от зоны оптического разряда. На расстоянии 40 мм от плазмы 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 мм) и $\sim 30^\circ$ вдали от плазмоида (40 мм). Оценка повышения температуры в тепловом следе после энергоподвода в сверхзвуковой поток, проведенная с учетом трехмерного характера течения струи, величины расхода воздуха, проходящего через зону энерговыделения, теплофизических характеристик воздуха, хорошо соответствует значениям поглощенной энергии.

Заключение

1. Впервые получен ОНР в сверхзвуковом потоке воздуха и исследованы значения коэффициента поглощения излучения CO_2 -лазера 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 кГц.

2. Впервые показано, что пороговая плотность воздуха в сверхзвуковом потоке, соответствующая резкому нарастанию эффективности поглощения, равна $1,8\text{--}2\text{ кг/м}^3$ и не зависит от числа Маха в диапазоне $1,7\text{--}3,7$.

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.

1. Борзов В.Ю., Михайлов В.М., Рыбка И.В., Савиценок Н.П., Юрьев А.С. Экспериментальное исследование сверхзвукового обтекания препятствия при энергоподводе в невозмущенный поток // Инж.-физ. ж. 1994. Т. 66, № 5. С. 515–520.

2. Третьяков П.К., Грачев Г.Н., Иванченко А.И., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. Стабилизация оптического разряда в сверхзвуковом потоке аргона // Докл. РАН. 1994. Т. 336, № 4. С. 466–467.
3. Зеркл Д.К., Шварц С., Мертогул Э., Чжэнь С., Криер Х., Мазумдер Дж. Исследование лазерной аргоновой плазмы применительно к проблеме электротермического ракетного двигателя // Ракетная техника и космонавтика. 1990. № 11. С. 3–13.
4. Тищенко В.Н., Гулидов А.И. Ускорение лазерной плазмы оптическим пульсирующим разрядом, движущимся в воздухе с гиперзвуковой скоростью // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26, вып. 19. С. 77–83.
5. Райзер Ю.П. О возможности создания оптического плазмотрона и необходимой для этого мощности // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11, вып. 3. С. 195–199.
6. Генералов Н.А., Зимаков В.П., Козлов Г.И., Масюков В.А., Райзер Ю.П. Непрерывно горящий оптический разряд // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11, вып. 9. С. 447–449.
7. Генералов Н.А., Захаров А.М., Косынкин В.Д., Якимов М.Ю. Устойчивость непрерывного оптического разряда в атмосферном воздухе // Физ. горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 2. С. 91–94.
8. Грачев Г.Н., Иванченко А.И., Пономаренко А.Г. Импульсно-периодический режим модулированной добротности CO_2 -лазера средней мощности 2 кВт и пиковой до 500 кВт: Тезисы докл. // Междунар. конф. «Оптика лазеров 93». СПб., 1993. С. 130.
9. Gobbi P.O., Reali G.C. A novel unstable resonator configuration with a self-filtering aperture // Opt. Commun. 1984. V. 52, N 3. С. 195–198.
10. Иванченко А.И., Крашенинников В.В., Пономаренко А.Г., Шулятьев В.Б. Самофильтрующий резонатор в CO_2 -лазере непрерывного действия // Квант. электрон. 1989. Т. 16, № 2. С. 305–307.
11. Малов А.Н., Оришич А.М., Фомин В.М., Внушков Д.А., Нализайченко Д.Г., Чиркашенко В.Ф. Исследование структуры сверхзвуковых течений воздуха с подводом энергии от квазистационарного оптического разряда // Изв. Том. политехн. ун-та. 2010. Т. 317, № 4. С. 155–160.
12. Афонин Ю.В., Гольшев А.П., Иванченко А.И., Малов А.Н., Оришич А.М., Филев В.Ф., Печурин В.А., Шулятьев В.Б. Генерация излучения с высоким качеством пучка в непрерывном CO_2 -лазере мощностью 8 кВт // Квант. электрон. 2004. Т. 34, № 4. С. 307–309.
13. Malov A.N., Orishich A.M., Shulyatyev V.V. High Power repetition Rate Q-switcher CO_2 Laser and its Application to Study the Optical Breakdown in a Supersonic Air Stream: Proc. SPIE // XVII Int. Sympos. on Gas Flow, Chemical Laser and High Power Laser. 15–19 September 2008. Lisbon, Portugal. 2008. V. 7131. P. 7131–7137.
14. Тищенко В.Н., Грачев Г.Н., Павлов А.А., Смирнов А.Л., Павлов А.А., Голубев М.П. Газодинамические эффекты взаимодействия неподвижного оптического пульсирующего разряда с газом // Квант. электрон. 2008. Т. 38, № 1. С. 82–87.
15. Запрягаев В.И., Киселев Н.П. Структура течения при взаимодействии единичной микроструи с потоком сверхзвуковой струи // Прикл. мех. и техн. физ. 2009. Т. 50, № 3. С. 104–111.
16. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 308 с.

A.N. Malov, A.M. Orishich, T.A. Bobarykina, V.F. Chirkashenko. **Investigation of the optical discharge and absorption of energy of the high-power pulse-periodical CO₂-laser in a supersonic air jet.**

The paper presents the results of the study of the optical discharge and absorption of CO₂-laser radiation in the optical-discharge plasma in a supersonic air jet within Mach number range from 1.7 to 3.7. Qualitative experimental data about the dynamics of radiation absorption in the forming laser plasma within the wide range of gas-dynamic parameters of the supersonic air flow (velocity, static pressure, density, Mach number) have been obtained for the first time. It is demonstrated that the threshold density of air in the supersonic flow corresponds to the dramatic rise of the absorption efficiency and is equal to 1.8–2 kg/m³. The coefficient of laser radiation absorption in the optical-breakdown plasma has been measured for the supersonic air flow within the wide range of gas-dynamic parameters. The maximum value of the absorption coefficient reaches 60%. The distributions of the gas-dynamic parameters in the supersonic jet (dynamic pressure and temperature) with the energy supply from the optical breakdown plasma are given. The results of the work enable one to determine the supersonic flow parameters, which provide for a high level of the energy contribution into the flow and, hence, the ability to control the structure of such a flow.