

Ю.В. Павутницкий, Д.С. Смирнов, И.А. Федоров, М.В. Шиленков

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МОЩНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ HF-НЕПРЕРЫВНОГО ХИМИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА
С ДВИЖУЩЕЙСЯ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДОЙ В УСЛОВИЯХ
ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ**

Рассмотрено изменение прозрачности слоя движущихся со скоростью 1200 м/с мелкодисперсных частиц углерода и оксида магния при воздействии мощного (до 20 МВт/м² при размере пучка 50 x 25 мм) излучения непрерывного химического HF-лазера в условиях пониженного до 50 Па давления.

Выявлено наличие просветления подобной дисперсной среды при повышенных интенсивностях излучения. Получены экспериментальные оценки порогового значения плотности мощности воздействующего излучения при стационарном режиме просветления. Установлены зависимости объемного коэффициента ослабления от интенсивности лучистого потока и массовой плотности тока частиц.

Полученные данные свидетельствуют об отличии механизма просветления подобной дисперсной среды от известных представлений и ставят вопрос о дальнейшем его исследовании.

Появление мощных лазеров космического базирования, прежде всего HF (DF)- непрерывных химических лазеров (НХЛ), делает возможным решение ряда перспективных задач, связанных с воздействием излучения таких источников на мелкодисперсные аэрозольные и космозольные частицы. К ним прежде всего можно отнести задачи лазерного зондирования атмосферы, а также приобретающие все большую важность задачи активного воздействия на мелкодисперсные частицы антропогенного происхождения, загрязняющие космическое пространство и верхние слои атмосферы. Следует заметить, что характеристики таких мелкодисперсных частиц отличны от параметров атмосферного аэрозоля.

В этой связи большую актуальность имеют экспериментальные исследования вопросов взаимодействия лазерного излучения высокой интенсивности с движущимися дисперсными средами при пониженном давлении окружающей среды.

Среди ряда особенностей таких исследований, определяющих их большую сложность, следует прежде всего отметить необходимость обеспечения высоких плотностей мощности излучения (до нескольких десятков мегаватт на квадратный метр) при больших потребных размерах поперечного сечения луча, а также проведения необходимых измерений при таких параметрах излучения.

В настоящей статье описаны эксперименты по исследованию процессов взаимодействия мощного излучения HF-НХЛ с движущейся сажиистой дисперсной средой, создаваемой специальным пиротехническим генератором в условиях пониженного до 50 Па давления окружающей среды. Цель экспериментов состояла в выявлении эффектов, возникающих при подобном взаимодействии, и определении некоторых количественных характеристик этих процессов.

В состав экспериментального комплекса входят: источник излучения HF-НХЛ с излучаемой мощностью до 30 кВт, экспериментальная сборка, генератор дисперсной среды пиротехнического типа, оптическая схема, системы измерений, автоматического управления, а также вспомогательные системы.

Поток мелкодисперсных частиц создается с помощью генератора пиротехнического типа во внутреннем объеме герметичной экспериментальной сборки, которая вакуумируется. Этот газодисперсный поток содержит 70% твердой фазы (по массе), состоящей из равных долей частиц пиролитического углерода и оксида магния. Средний размер частиц около 1 мкм, скорость частиц в районе пояса иллюминаторов порядка 1200 м/с.

Для ввода и вывода лазерного излучения, а также проведения необходимых измерений сборка снабжена оптическими входами, оси которых расположены в одной плоскости. <Силовое> излучение падает на слой дисперсной среды перпендикулярно направлению вектора ско-

рости частиц. Сборка также снабжена устройствами для регулирования плотности газодисперсного потока и отбора проб частиц.

Все основные элементы комплекса, за исключением используемой оптической схемы, были подробно описаны в [1].

Оптическая схема представлена на рис. 1. Она включает: 1, 10 – сферические фокусирующие зеркала; 2, 5, 11, 15, 16, 31 – пластины делительные; 3, 18 – болометрические измерители мощности проходного типа; 7 – измерительный канал; 6, 9 – окна иллюминаторов; 13, 14, 20 – плоские зеркала; 4, 17, 19 – поглотители; 12 – зачерненный медный термопоглощающий экран; 8 – сканер тепловизора; 21, 30, 33 – линзы; 22, 29 – модуляторы; 23, 28 – интегрирующие сферы; 24, 27 – пироэлектрические приемники оптического излучения типа МГ-30 А; 34 – диафрагма; 32 – термопарный калориметр; 25 – фильтр КС-15; 26 – скоростная кинокамера СКС-1М.

Оптические элементы иллюминаторов измерительного канала и линзы выполнены из $\text{BaF}_2(\text{CaF}_2)$, а делительные пластины из кварца марки КИ.

Коллимация излучения в районе дисперсной среды осуществляется при помощи медного сферического зеркала 1. Его фокусное расстояние 1,5 м, а перетяжка имеет протяженность, превышающую глубину слоя дисперсной среды. Размеры поперечного сечения в зоне перетяжки зависят от режима работы лазера и составляют около 50 x 20 мм (наибольший размер ориентирован вдоль движения частиц). Ход лучей в оптической схеме ясен из рисунка.

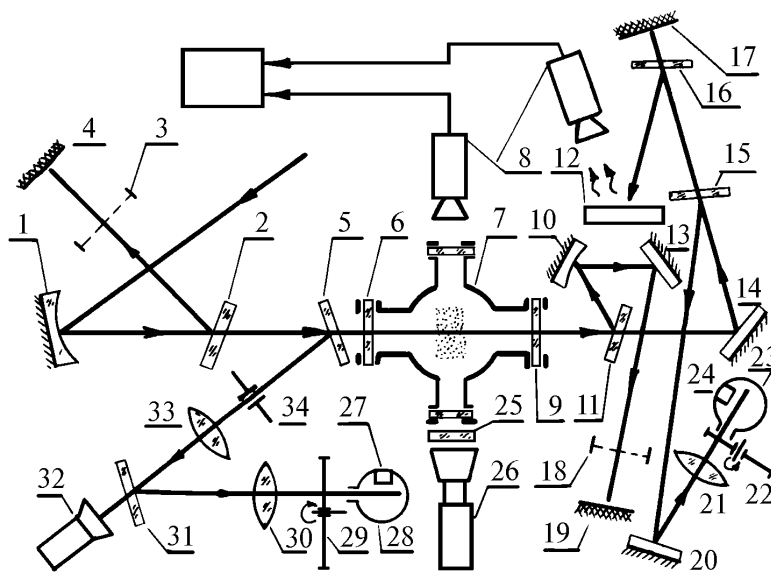


Рис. 1

Измерение параметров излучения на <входе> в экспериментальную сборку проводилось с помощью охлаждаемого термопарного калориметра <COHERENT RADIATION>, модель 203 (США) 32 (см. рис. 1), болометрического измерителя мощности излучения (3) и пироэлектрического приемника МГ-30 А 27. Параметры излучения, прошедшего слой дисперсной среды, замерялись по двум каналам аналогичными приборами 18, 24.

Для оценки характера распределения плотности мощности излучения в плоскости, перпендикулярной лучу, часть <выходного> излучения отводилась на медную пластину толщиной 30 мм с зачерненной поверхностью, на которой строилось изображение поперечного сечения луча на выходе из слоя дисперсной среды. Температурное поле в зоне нагрева фиксировалось тепловизионной системой Т-800 <АГЕМА>. С помощью этой системы также проводились наблюдения теплового поля частиц в зоне облучения, для чего сканер тепловизора располагался у одного из иллюминаторов (см. рис. 1), при этом рассеяное на частицах излучение НФ-НХЛ <отсекалось> специальным встроеным фильтром.

Методика проведения экспериментов предусматривала запуск генератора дисперсной среды позднее момента начала генерации излучения, что позволяло снять показания всех дат-

чиков при отсутствии дисперсной среды в измерительном канале и определить соответствующие коэффициенты масштабирования показаний датчиков на <входе> и <выходе> из слоя.

Прохождение излучения НФ-НХЛ через слой мелкодисперсных частиц исследовалось в диапазоне плотностей мощности от 0,2 до 20 МВт/м². Типовые зависимости объемного коэффициента ослабления излучения α_λ слоем при различных плотностях тока частиц (0,27 кг/м²/с – кривая 1 и 0,14 кг/м²/с – 2) от интенсивности воздействующего излучения q представлены на рис. 2. Для этих зависимостей характерно наличие двух участков: квазилинейного, в пределах которого экранирующие свойства слабо зависят от интенсивности воздействующего излучения (до 3 МВт/м²), и нелинейного. Наличие нелинейного участка свидетельствует о просветлении слоя частиц при увеличении плотности мощности свыше некоторого (порогового) значения.

На рис. 3 показаны зависимости объемного коэффициента ослабления от плотности тока частиц \bar{m} при различных уровнях плотности мощности излучения. Данные зависимости в исследованном диапазоне носят линейный характер.

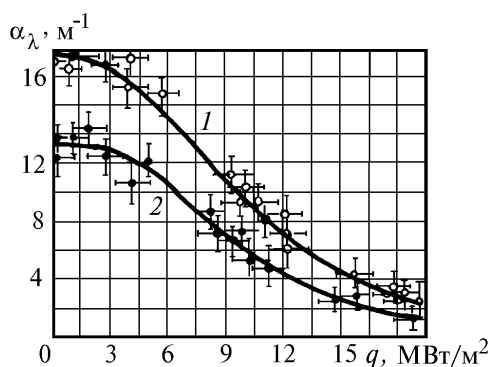


Рис. 2

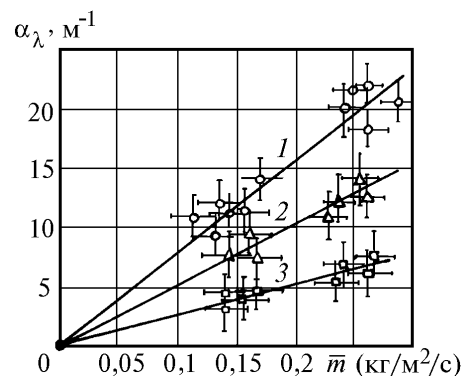


Рис. 3. Плотность мощности воздействующего излучения: кривая 1 – 3; 2 – 9; 3 – 13 МВт/м²

В целом характер зависимостей объемного коэффициента ослабления от плотности мощности и массовой плотности тока частиц согласуется с устоявшимися представлениями о просветлении дисперсных сред [2]. Однако полученное в ходе экспериментов значение интенсивности излучения, соответствующее началу активного проявления нелинейных эффектов, составило около 3 МВт/м². В то же время имеется ряд экспериментальных работ, посвященных исследованию как отдельных сажистых частиц [3], так и разреженных аэрозолей [4, 5] в поле мощного оптического излучения, где приводятся данные о наблюдении подобных нелинейных эффектов при существенно большей интенсивности излучения. Например, в [5] просветление сажистого аэрозоля в условиях пониженного давления воздуха наблюдалось при плотности излучения порядка 100 МВт/м² и более.

По-видимому, столь низкий порог начала просветления обусловлен прежде всего особенностями дисперсных частиц, формируемых в пиротехническом генераторе в результате конденсации продуктов сгорания специального заряда. Кроме того, следует отметить, что, как правило, в подобных экспериментах для достижения высокой интенсивности излучения используется короткофокусная оптика. При этом объем фокальной области достаточно мал и характеризуется существенной неравномерностью распределения плотности мощности как по глубине трассы, так и в поперечном сечении луча, в связи с чем возрастают неизбежные погрешности в определении параметров воздействующего излучения и процесса просветления.

При наблюдении нагрева частиц в зоне облучения отмечено существенное снижение их температуры по глубине трассы в дисперсной среде. На термограмме, показанной на рис. 4, фронтальная поверхность слоя частиц при воздействии излучением с плотностью мощности около 7 МВт/м² имеет температуру около 1700 – 2000 К, а тыльная 900 – 1000 К. При указанных параметрах воздействия и температурах время сублимации углеродистых частиц согласно [4] составляет десятки секунд, тогда как время пребывания частиц в поле луча в данном случае не более 5 мкс.

Указанное обстоятельство свидетельствует о реализации механизма просветления данной ДС, отличного от сублимационного, выделенного в [5] в качестве основного для условий пониженного давления окружающей среды.

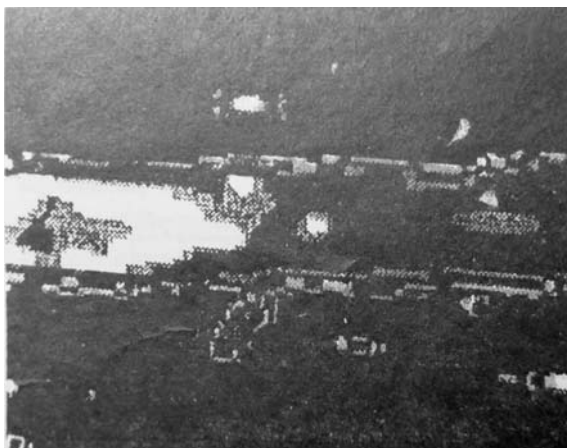


Рис. 4

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено наличие просветления сажиистой мелкодисперсной среды при плотостях мощности воздействующего излучения свыше 3 МВт/м^2 в условиях пониженного до 50 Па давления окружающей среды. Полученные данные не согласуются с некоторыми результатами иных экспериментов, что свидетельствует о недостаточной пока изученности процессов прохождения мощного непрерывного лазерного излучения сквозь подобные дисперсные среды в условиях разрежения и ставят вопрос о необходимости более детального исследования механизмов просветления данной дисперсной среды.

1. Грибакин В.А., Павутницкий Ю.В., Федоров И.А., Шиленков М.В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. №5. С. 565–571.
2. Зуев В.Е., Копытин Д.Ю., Кузиковский А.В. Нелинейные оптические эффекты в аэрозолях. Новосибирск: Наука, 1980. 182 с.
3. Букатый В.И., Краснопевцев В.Н., Шайдук А.М. // Физика горения и взрыва. 1990. №1. С.41–48.
4. Попова Л.В. и др. // Материалы III Всесоюзного совещания по распространению лазерного излучения в дисперсных средах. Ч. IV. (Тезисы докл.). Обнинск. 1985. С. 191 – 195.
5. Лоскутов В.С., Стрелков Г.М. // Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. (Тезисы докл.). Томск: ТНЦ СО АН СССР, 1989. С. 292–293.

Военная инженерно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,
Российский центр прикладной химии, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
21 декабря 1993 г.

Yu.V. Pavutniskii, D.S. Smirnov, I.A. Fedorov, M.V. Shilenkov. Nonlinear Effects at Interaction of High Power Radiation of a CW HF-Laser with a Moving Disperse Medium under Low Pressure.

In this paper we present an experimental study of the transmission of a layer of small particles of carbon and magnesium oxide moving at a speed of 1200 m/s under the action of a high power laser beam from a cw HF-laser. Power density of the output laser beam reached the value 20 MW/m^2 within the beam cross section of 25 by 50 mm size.

In our experiments we have observed the effect of clearing up of such a medium at enhanced power density of the beam. We have also determined the value of power density threshold at which the clearing up is of stationary behavior. In this study we managed to reveal the dependence of the volume scattering coefficient of such a medium on the beam intensity and mass density of the particles flux.

The data we have obtained in this study show that the mechanism of clearing up of such a medium differs from earlier known models. The latter result demonstrates the necessity of studying this process in more detail.