

## РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 530.182.551.42

**В.А. Грибакин, Ю.В. Павутницкий, И.А. Федоров, М.В. Шиленков**

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ HF-НЕПРЕРЫВНОГО ХИМИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА ЧЕРЕЗ СЛОЙ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ**

Исследуется ослабление излучения HF-непрерывного химического лазера при прохождении через движущуюся многокомпонентную полидисперсную среду, содержащую частицы углерода и окиси магния размером около 1 мкм при пониженном до 50 Па давлении окружающей среды. Разработан и создан экспериментальный комплекс, позволяющий исследовать процессы взаимодействия излучения с дисперсными средами различной плотности в условиях разреженной атмосферы. Получены численные значения объемного коэффициента ослабления в зависимости от плотности тока частиц.

Интерес к проблеме распространения лазерного излучения в атмосфере стимулируется большими потенциальными возможностями использования лазерных систем в практических целях. Одной из наиболее интересных систем подобного рода является система зондирования атмосферы из космоса на базе непрерывных HF (DF)-химических лазеров. Их перспективность обусловлена прежде всего высокими энергетическими параметрами этих источников зондирующего излучения при существующих для космического аппарата ограничениях массогабаритных характеристик.

В этой связи приобретает актуальность вопрос исследования взаимодействия излучения HF-непрерывного химического лазера (НХЛ) с различными составляющими атмосферы.

Значительное место среди них принадлежит мелкодисперсным частицам антропогенного происхождения. В последние годы в верхних слоях атмосферы возрастает доля таких частиц вследствие их выброса в качестве продуктов сгорания ракетного топлива. Данные частицы по своим характеристикам отличны от традиционного атмосферного аэрозоля [1, 2]. Кроме того, для исследования вопросов зондирования атмосферы достаточно специфична и длина волны излучения HF-НХЛ, что обусловлено определенной уникальностью данного лазера.

Эти обстоятельства предопределяют недостаточную пока изученность процессов взаимодействия излучения HF-НХЛ с упомянутыми мелкодисперсными частицами. Экспериментальное исследование данных процессов затруднено вследствие сложности необходимой лабораторной базы, обусловленной особенностями источников излучения, генератора мелкодисперсных частиц, а также условиями окружающей среды.

В настоящей статье рассмотрен экспериментальный комплекс, созданный для проведения таких исследований, а также представлены результаты экспериментального исследования прохождения излучения HF-НХЛ через слой движущихся сажистых дисперсных частиц, создаваемых пиротехническим генератором в условиях пониженного до 50 Па давления окружающей среды. Плотность мощности излучения не превышала 3 МВт/м<sup>2</sup>.

Разработанный экспериментальный комплекс позволяет проводить исследования процессов взаимодействия излучения HF-НХЛ с мелкодисперсными частицами при широком варьировании параметров излучения, мелкодисперсной среды и условий окружающей среды.

В состав экспериментального комплекса входят: источник излучения – HF-НХЛ; экспериментальная сборка; генератор дисперсной среды пиротехнического типа; оптическая схема; системы измерений, автоматического управления; обеспечивающие системы.

Главные особенности источника излучения состоят в следующем. Сопловый блок и резонатор НХЛ смонтированы в вакуумной камере, связанной трубопроводом большого диаметра с вакуумной системой общим объемом 2100 м<sup>3</sup>. Она откачивается до остаточного

давления, равного 50 Па, и в эту систему осуществляется выхлоп продуктов реакции из соплового блока. Время генерации луча фактически ограничивается временем нарастания давления в вакуумной камере и составляет 15...17 с. Излучаемая мощность лазера достигает нескольких десятков киловатт.

Используемый НФ-НХЛ является стендовой установкой универсального назначения. Все остальные составляющие комплекса созданы с учетом особенностей данного стенда и существующих ограничений (по габаритам, длительности функционирования, требованиям безопасности).

Одним из основных элементов является экспериментальная сборка. Она предназначена для создания потока мелкодисперсных частиц с требуемыми параметрами в условиях пониженного давления. Схема экспериментальной сборки приведена на рис. 1. Она включает в себя канал формирования потока дисперсной среды 2, измерительный канал 1, снабженный иллиминаторами для ввода излучения и проведения измерений, переходную горловину 3, сборную емкость 4, оптический стол 5. Каналы 1, 2, горловина 3 и емкость 4 образуют замкнутую полость, которая вакуумируется. Дисперсная среда, создаваемая модельным генератором, поступает в канал формирования 2, затем в измерительный канал и далее через горловину 3 в сборную емкость 4, связанную с вакуумной системой стенда. Поперечное сечение измерительного канала в плоскости расположения иллиминаторов показано на рис. 1. В патрубках иллиминаторов смонтированы специальные кольцевые сопла, обдувающие оптику иллиминаторов для защиты от загрязнения частицами дисперсной среды.

Внутри каналов 1 и 2 находится устройство для регулирования плотности тока частиц. Оно состоит из сопла 7 и формирующей сборки 8. Круглое сопло 7 в своем выходном сечении имеет прямоугольную форму. Такую же форму поперечного сечения имеет сборка 8. Соединение сопла 7 и формирующей сборки 8 осуществляется через лабиринтное уплотнение. При этом сопло выполнено подвижным. Его перемещение производится специальным электроприводом. Сборка 8 имеет плоскую отбортовку, которая герметично зажимается между фланцами каналов 1 и 2. Стенки канала 2, формирующей сборки 7 и отбортовка образуют замкнутую полость, в которую отводится часть газо-дисперсного потока. Изменение плотности тока частицы обеспечивается путем варьирования величиной зазора между выходным сечением сопла генератора и входным сечением сопла формирующей сборки.

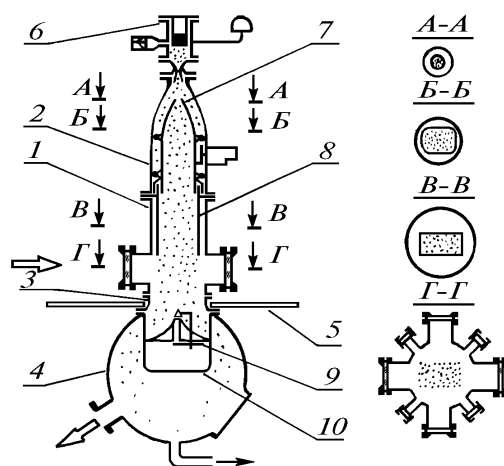


Рис. 1

В переходной горловине смонтировано устройство для отбора проб, представляющее собой изокINETический отборник, состоящий из калиброванного канала с полированными стенками и вращающегося диска 9, на котором закреплены предметные стекла. Оси отборного канала и вращения диска параллельны и смещены друг относительно друга таким образом, чтобы осаждение частиц осуществлялось на периферийную часть диска. На верхнем срезе канала установлено сверхзвуковое заборное устройство. До начала отбора пробы заборник закрыт

затвором, в заданный момент времени он открывается на период одного оборота диска, в результате чего происходит осаждение части потока дисперсной среды на предметные стекла.

Генератор дисперсной среды 6 конструктивно подобен ракетному двигателю твердого топлива. Он оснащен шашкой из сажеобразующего пиротехнического состава, выполненной в виде торцевого либо канального заряда (в зависимости от требуемого расхода дисперсной среды), в результате сгорания которого образуется газодисперсный поток с массовым содержанием твердых частиц до 70%.

Оптическая схема экспериментального комплекса показана на рис. 2, где 1, 11 – сферические зеркала; 2, 3, 10, 12, 23 – делительные пластины; 4, 8, 29 – болометрические измерители мощности проходного типа; 6 – измерительный канал; 5, 7 – окна иллюминаторов; 9, 15, 24 – плоские зеркала; 30 – поглотитель; 13 – зачерненный медный термически тонкий экран; 14 – сканер тепловизора; 16, 21, 25 – линзы; 17, 26 – модуляторы; 18, 27 – интегрирующие сферы; 19, 28 – пирозлектрические приемники типа МГ-30А; 20 – диафрагма; 22 – термопарный калориметр.

Оптические элементы иллюминаторов измерительного канала и линзы выполнены из  $BaF_2(CaF_2)$ , а делительные пластины – из кварца марки КИ.

Коллимация лазерного луча в районе прохождения дисперсной среды осуществляется при помощи длиннофокусного сферического зеркала 1. Его перетяжка имеет протяженность, превышающую глубину слоя дисперсной среды. Размеры поперечного сечения в зоне перетяжки зависят от режима работы лазера и находятся в диапазоне от  $70 \times 30$  до  $40 \times 15$  мм, причем наибольший размер ориентирован вдоль движения частиц.

Измерительная система комплекса содержит три подсистемы: подсистему измерения параметров излучения; параметров дисперсной среды; вспомогательных параметров.

В состав первой входят: термопарный калориметр <COHERENT RADIATION>, модель 201 (США); два малоинерционных болометрических измерителя мощности излучения проходного типа; два пирозлектрических приемника МГ-30А; тепловизионная система TV-800 <AGEMA> (Швеция).

Элементы подсистемы измерения параметров дисперсной среды позволяют определить скорость движения частиц в канале, массовую плотность тока частиц, дисперсность ансамбля частиц и распределение массовой плотности тока частиц по сечению измерительного канала. В число этих элементов входят: описанное выше устройство отбора проб, лазерный доплеровский анемометр, сборная матрица, микроаналитические весы ВЛР-200, электронный микроскоп УЭМВ-100 В.

Методика определения параметров лазерного излучения позволяет оценить:

- уровень плотности мощности воздействующего излучения;
- степень ослабления излучения слоем дисперсной среды;
- характер распределения интенсивности излучения в поперечном сечении луча.

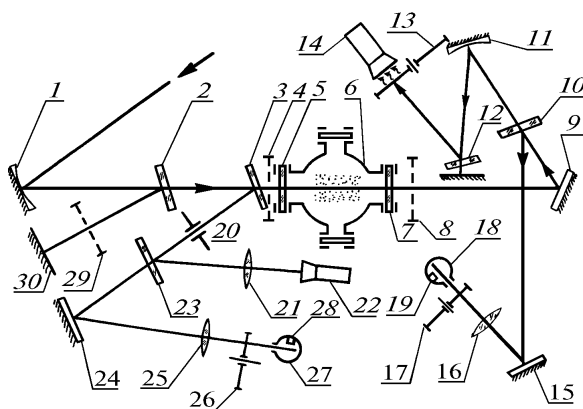


Рис. 2

Измерение плотности мощности лазерного излучения, падающего на фронтальную поверхность слоя дисперсной среды, производится по показаниям термопарного калориметра, на который отводится часть излучения при помощи делительных пластин (см. рис. 2.).

Оценка степени ослабления излучения при прохождении его через слой дисперсной среды осуществляется на основе показаний двух малоинерционных сеточных болометров проходного типа 4, 8, расположенных непосредственно перед <входным> и за <выходным> иллюминаторами измерительного канала, а также на основе показаний двух пироэлектрических приемников МГ-30А 19, 28, на которые излучение отводится со <входа> и <выхода> измерительного канала.

Запуск генератора дисперсной среды осуществлялся позднее момента начала генерации излучения, что позволяло снять показания всех датчиков в условиях отсутствия частиц в измерительном канале и определить коэффициенты соответствия (масштабирования) показаний датчиков на <входе> и <выходе> из слоя дисперсной среды.

Данная методика позволила произвести необходимые измерения при определенной нестабильности излучения НФ-НХЛ, обусловленной его конструктивными особенностями (выхлоп в вакуумную систему конечного объема).

Для оценки характера распределения плотности мощности излучения в плоскости, перпендикулярной лучу, часть <выходного> излучения отводилась на тонкий медный экран с зачерненной поверхностью, на котором строилось изображение поперечного сечения луча на выходе из слоя дисперсной среды. Температурное поле в зоне нагрева фиксировалось сканером тепловизора, информация с которого передавалась на монитор и записывалась на магнитный диск ПЭВМ. Частота съемки равнялась 25 кадрам в секунду.

Скорость частиц в потоке дисперсной среды определялась лазерным доплеровским анемометром, а массовая плотность тока частиц – путем отбора проб. Дисперсность ансамбля частиц характеризовалась статистической гистограммой распределения частиц по размерам, построенной по стандартной методике.

В ходе экспериментов были уточнены параметры дисперсной среды, создаваемой пиротехническим генератором в условиях экспериментального комплекса. Проводился рентгено-структурный анализ твердой фазы, показавший, что частицы содержат в среднем равное количество углерода и окиси магния, а также около 7% аморфной компоненты, очевидно, состоящей из продуктов разложения внутренней теплозащиты генератора.

Форма, структура и дисперсность частиц исследовались с помощью электронного микроскопа УЭМВ-100 В. В структуре твердой фазы были отмечены два уровня: микрочастицы с размерами 0,02 – 0,1 мкм, близкие по форме к сферическим (около 10%), и первичные агрегаты, состоящие из хаотично ориентированных скоплений микрочастиц. Форма первичных агрегатов существенно отлична от сферической. Распределение частиц по размерам описывалась логарифмически нормальным распределением с математическим ожиданием 1 мкм и дисперсией 0,096 мкм.

Таким образом, частицы, создаваемые пиротехническим генератором, в достаточной степени подобны мелкодисперсной составляющей антропогенного загрязнения верхних слоев атмосферы [3].

Как показали проведенные исследования, сложный химический состав, полидисперсность и сложная, нерегулярная форма частиц существенно затрудняют возможность теоретического определения оптических характеристик подобной среды, что еще раз подтверждает необходимость их экспериментального определения.

В качестве основной кинетической характеристики потока частиц была выбрана массовая плотность тока  $\bar{m}$ , равная массе частиц, протекающих через единичную площадку в единицу времени. В ходе эксперимента был определен диапазон варьирования  $\bar{m}$  в зависимости от положения формирующего сопла, который составил  $0,08 < \bar{m} < 0,30$  кг/м<sup>2</sup>/с, а также получено распределение плотности тока в поперечном сечении измерительного канала, оказавшееся близким к равномерному.

В процессе исследования прохождения излучения НФ-НХЛ через слой описанной дисперсной среды установлено, что она является преимущественно поглощающей для данной длины волны.

Этот вывод основывается на анализе картин распределения интенсивности излучения в плоскости выходного иллюминатора при отсутствии дисперсной среды в измерительном канале (исходное распределение), рис. 3, а, и при прохождении излучения через слой дисперсной среды, рис. 3, б. Из анализа представленных термограмм следует, что наблюдается

близкое к равномерному ослабление интенсивности излучения по всей площади пятна, при этом увеличения размеров пятна не происходит.

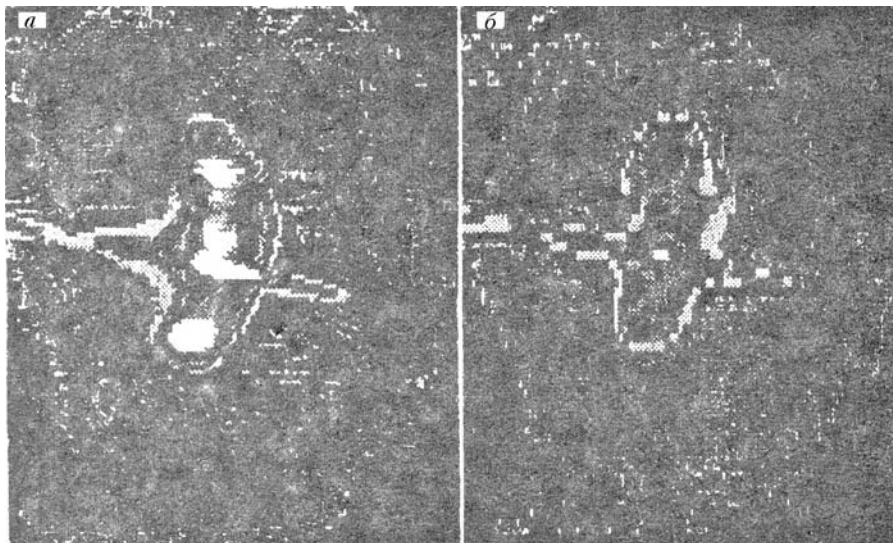


Рис. 3

Вывод о поглощающем характере частиц подтверждается и показаниями болометра (позиция 4, рис. 2), расположенного у входного иллиуминатора. При пуске генератора дисперсной среды прироста в показаниях прибора не наблюдается, что свидетельствует о том, что интенсивность излучения, рассеянного назад, мала.

Преимущественно поглощающий механизм ослабления лазерного излучения с длиной волны 2,71 мкм исследуемой дисперсной средой обусловлен прежде всего ее мелкодисперсностью. Как показано выше, размеры частиц заметно меньше длины волны излучения, вследствие чего вклад рассеяния в ослабление излучения незначителен. Это находится в соответствии и с выводами теории [2], и с существующими экспериментальными данными [4].

В ходе исследований была проведена серия экспериментов, в которых варьировалась массовая плотность тока частиц. Установлено, что ослабление излучения с достаточной точностью описывается уравнением Бугера, а зависимость объемного коэффициента ослабления излучения от массовой плотности тока частиц носит линейный характер (рис. 4) и изменяется от 5...8 м<sup>-1</sup> для  $\bar{m} = 0,1$  кг/м<sup>2</sup>/с до 19...21 м<sup>-1</sup> при  $\bar{m} = 0,25$  кг/м<sup>2</sup>/с.

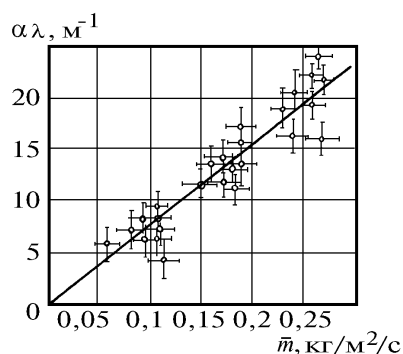


Рис. 4

Таким образом, проведенные исследования показали, что мелкодисперсные среды подобного состава и происхождения являются существенным препятствием для распространения излучения HF-НХЛ в верхних слоях атмосферы вследствие их достаточно высокой экранизирующей способности. Этот факт требует обязательного учета при решении задач зондирования различных объектов из космоса с использованием лазерных систем на основе HF-НХЛ.

1. 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.
2. Распространение лазерного пучка в атмосфере / Под ред. Д. Стробена. М.: Мир, 1981. 416 с.
3. Поттер А.Э. // Аэрокосмическая техника. 1989. N 5. С. 143 – 145.
4. Бойнтон Ф.Р., Людвигович С.В., Томсон А. // Ракетная техника и космонавтика. 1968. N 5. С. 116–124.

Военная инженерно - космическая академия  
им. А. Ф. Можайского  
Российский научный центр <Прикладная химия>, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию  
21 декабря 1993 г.

V. A. Gribakin, Yu. V. Pavutnitskii, I. A. Fedorov, M. V. Shilenkov.  
**Experimental Study of an HF CW Laser Beam Propagation through a Layer of a Disperse and Absorbing Medium at Low Pressure.**

This paper presents a study of the extinction process of a CW HF chemical laser beam when passing through a moving multicomponent and polydisperse medium composed of aerosol particles of carbon and magnesium oxide about 1  $\mu\text{m}$  size at a pressure of 50 Pa. We also describe in the paper an instrumental complex developed for studying the processes of light interaction with disperse media of different densities under conditions of low pressure atmosphere. Numerical values of the volume extinction coefficient are given as a function of particles flux density.