

Измерительные комплексы для исследования распространения лазерного излучения на атмосферных трассах

В.А. Банах¹, В.В. Жмылевский², А.Б. Игнатьев²,
В.В. Морозов², В.А. Погодаев¹, Р.Ш. Цвык^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Головное системное конструкторское бюро Концерна ПВО «Алмаз—Антей»
им. академика А.А. Расплетина, г. Москва

Поступила в редакцию 16.07.2009 г.

Представлены результаты многолетних экспериментальных исследований распространения лазерного излучения на атмосферных трассах. Опыт разработки и эксплуатации в полевых условиях макетов исследовательской аппаратуры, микрофизического моделирования динамики процессов взаимодействия лазерного излучения с компонентами атмосферы в лабораториях обобщается на состав единого специализированного комплекса.

Ключевые слова: комплекс, лазерное излучение, атмосфера, нелинейное взаимодействие; complex, laser radiation, atmosphere, nonlinear interaction.

Введение

Быстрое развитие лазерной техники и широкие перспективы ее применения в науке и технике привели к созданию в 1969 г. Института оптики атмосферы СО РАН под руководством В.Е. Зуева, основное внимание в котором сосредоточено на комплексном исследовании распространения оптических волн в атмосфере и различных средах и на разработке средств зондирования этих сред.

Итоги теоретических и экспериментальных исследований, которые были обобщены в монографиях [1–9], показали, что для корректного анализа результатов измерений необходимо знать как минимум следующие параметры:

метеорологические — температуру и градиент температуры, давление, влажность, направление и скорость ветра;

оптические — общее ослабление, коэффициенты поглощения и рассеяния для длин волн излучения, концентрацию частиц аэрозолей и их распределение по размерам;

источника излучения — мощность (энергия), длительность и форма импульсов и их временное и пространственное распределение на выходе источника и в конце измерительной трассы.

Это позволило к началу 70-х гг. XX в. определить основные требования к разработке методов и измерительных средств для проведения масштабных исследований по распространению лазерного излучения на природных атмосферных трассах. Поэтому в 1972 г. было основано СКВ НП «Оптика» СО АН СССР, главная задача которого заключалась в обеспечении научных программ Института техническими средствами. Эта задача успешно решалась сотрудниками СКВ в течение более 20 лет. Многие из разработок были уникальными для своего времени, на многие из них были получены авторские свидетельства.

Один из первых комплексов для атмосферных исследований распространения лазерного излучения в атмосфере создан в Институте и СКВ в 1975 г. под руководством профессора С.С. Хмелевцова, одного из первых учеников В.Е. Зуева. Основанием для разработки являлись макеты, на которых были отработаны методики измерений, определены диапазоны и ошибки измерений. В состав комплекса в стационарном исполнении входили: двухуровневая метеосистема, измеритель прозрачности на длине волны $\lambda = 0,63$ мкм, оптический измеритель турбулентности.

Все следующие комплексы были выполнены в мобильном варианте (автомобильные прицепы) и устанавливались в требуемых местах измерительной трассы. Так как наибольшее внимание к себе в связи с высоким кпд и мощностью привлекли CO₂-лазеры, то комплексы оснащались двухволновыми лазерными измерителями прозрачности с применением He—Ne- и CO₂-лазеров, более совершенным

Виктор Арсентьевич Банах (Banakh@iao.ru); Виктор Васильевич Жмылевский; Александр Борисович Игнатьев; Владимир Варнавьевич Морозов; Виталий Алексеевич Погодаев (kam@iao.ru); Рувим Шахнович Цвык (tsvyk@iao.ru).

быстродействующим оптическим измерителем турбулентности на базе диссекторной следящей системы, системой сбора и обработки информации на базе ЭВМ Электроника-60.

Для измерения параметров излучения разрабатывались различные методы и средства с применением: тепловизионных систем; измерительных матриц на основе термоэлектрических преобразователей для непрерывных и частотно-импульсных лазеров; сеточных измерителей распределения энергии для импульсных лазеров; сканирующих измерителей мощности проходного типа; матрицы Гартмана на основе зеркальных элементов размером 20×20 мм (16 на 16 шт.), фокусным расстоянием 3150 мм; спектрометров для измерения спектрального состава излучения [8].

Разрабатывались методы и средства определения вариаций параметров среды в канале излучения. К ним относились: измерение параметров зондирующего лазерного пучка; измерение акустических волн, генерируемых мощным импульсным излучением при взаимодействии с компонентами атмосферы.

При проведении исследований на природных трассах основное внимание уделялось: общему энергетическому ослаблению излучения за счет рассеяния, поглощения и изменения теплофизических и оптических характеристик среды в канале мощного лазерного излучения (МЛИ); влиянию нелинейных эффектов взаимодействия МЛИ с атмосферой: тепловому самовоздействию; пробой на частицах аэрозоля при высоких плотностях энергии; акустическим волнам, генерируемым импульсным излучением.

В данной статье мы остановимся лишь на одном из направлений выполненных работ – на измерительных комплексах для обеспечения исследований распространения МЛИ на атмосферных трассах и результатах экспериментов с их использованием. При исследованиях решались многие фундаментальные задачи взаимодействия МЛИ с атмосферой и проверялись выводы теоретических работ, а анализ получаемых результатов, в свою очередь, ставил перед теорией новые задачи.

1. Результаты исследований

Исследования ослабления МЛИ выполнены с использованием CO_2 -лазеров непрерывного, квазинепрерывного и импульсного излучения в условиях слабозамутненной атмосферы на трассах различной протяженности L .

Общее энергетическое ослабление излучения CO_2 -лазера в атмосфере в основном определяется поглощением парами воды $\alpha_m(\text{H}_2\text{O})$, углекислого газа $\alpha_m(\text{CO}_2)$ и ослаблением аэрозолем α_e , т.е. суммарный коэффициент ослабления излучения α_s включает 3 составляющие [8, 10]:

$$\alpha_s = \alpha_m(\text{H}_2\text{O}) + \alpha_m(\text{CO}_2) + \alpha_e.$$

На рис. 1 приведены результаты измерений коэффициента передачи T_n в сравнении с расчетным пропусканием по метеоданным $T_p = \exp(-\alpha_s L)$.

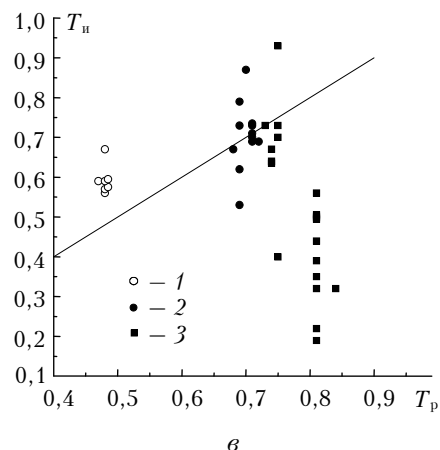
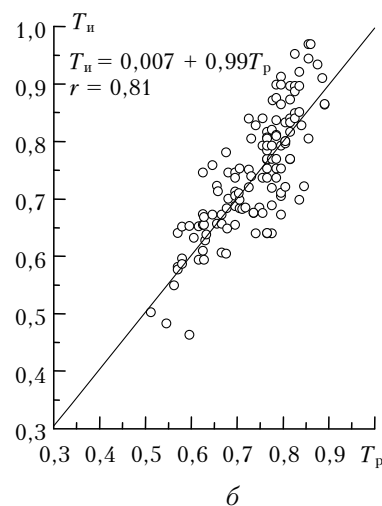
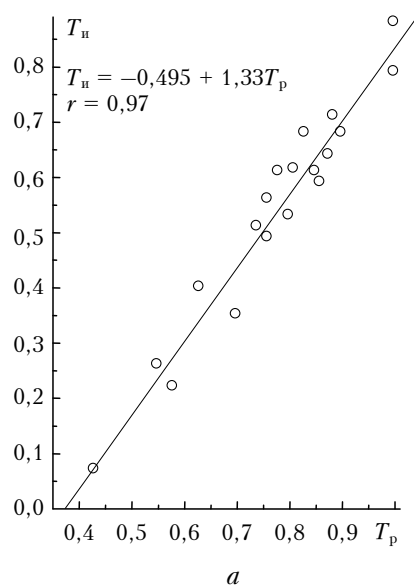


Рис. 1. Соответствие экспериментально измеренных коэффициентов передачи МЛИ атмосферой рассчитанным по метеоданным для непрерывного (а), частотно-импульсного (б), импульсного (в) режимов работы CO_2 -лазеров

Прямые рассчитаны методом наименьших квадратов и описываются уравнением $T_n = a + bT_p$

с коэффициентом корреляции r . В анализе экспериментальных данных не учитывались изменчивость коэффициента ослабления во время взаимодействия излучения со средой и ее влияние на конечный результат.

То, что наклон экспериментальной зависимости для непрерывного лазера отличается от прямой регрессии, указывает на нелинейный характер взаимодействия излучения при распространении в атмосфере при метеорологической дальности видимости $S_m = 6 \div 8$ км и скорости ветра менее 1 м/с.

Линейная связь измеренного коэффициента передачи и рассчитанного коэффициента пропускания атмосферы для квазинепрерывного лазера подтверждает применимость данной методики оценочного прогноза коэффициента ослабления по измеренным метеоданным при слабом аэрозольном замутнении атмосферы ($S_m > 15$ км) для лазерного излучения при плотности энергии в импульсе порядка единиц Дж·см⁻².

Импульсный режим работы источника излучения более непредсказуем. В ходе экспериментов обнаружена зависимость T_{II} от оптико-метеорологического состояния (ОМС) атмосферы. Величина T_{II} для конкретного значения T_p может меняться в разы при изменении соотношения между аэрозольной и молекулярной составляющими ослабления

$$\eta = [\alpha_m(\text{H}_2\text{O}) + \alpha_m(\text{CO}_2)]/\alpha_e.$$

Рис. 1, в иллюстрирует данное утверждение для трех диапазонов изменения η : 1) $\eta = 0,2 \div 0,4$, тип оптической погоды — морось; 2) $\eta = 0,2 \div 0,4$ и 3) $\eta = 0,61 \div 0,8$ для дымки весны и осени.

Исследование теплового самовоздействия лазерных пучков на протяженных атмосферных трассах представляет собой достаточно сложную задачу в связи с одновременным действием всех факторов влияния атмосферы на параметры пучка. Действие тепловой нелинейности происходит на фоне влияния турбулентности на флуктуации параметров пучка (флуктуации и уширение диаграммы направленности, пространственно-временные флуктуации интенсивности) и общего энергетического ослабления.

Следует отметить, что экспериментальные данные, получаемые различными исследовательскими группами, разнятся по форме представления материалов (анализ коэффициентов передачи от энергетических характеристик излучения либо зависимостей поведения отдельных параметров взаимодействия излучения и среды от обобщенного параметра нелинейности N_c [4]). Опускаются необходимые для анализа сведения о начальных условиях эксперимента (метео, геометрия излучения, параметры излучения), что делает невозможным конкретное сопоставление полученных результатов. Приведем основные результаты экспериментальных исследований самовоздействия лазерных пучков при распространении на атмосферных трассах, полученные авторским коллективом [11–16].

Одним из важных параметров распределения интенсивности в пучке является максимальная интенсивность и ее зависимость от уровня теплового самовоздействия, которое для фокусированного га-

уссова пучка характеризуется обобщенным параметром искажений N [4]:

$$N = N_c(a/a_f)q(a/a_f)f(V_f/V_\perp)g(\alpha L),$$

$$N_c = \frac{(\partial\epsilon/\partial T)\alpha I_0 L^2}{2\epsilon_0\rho_0 c_p V_\perp a} \text{ при } \alpha L \ll 1;$$

где a , V_\perp , a_f , V_f — радиус пучка и поперечная составляющая скорости у выходной апертуры, радиус фокального пятна и поперечная составляющая скорости ветра в конце измерительной трассы; $\partial\epsilon/\partial T$ — температурная зависимость диэлектрической проницаемости; α — коэффициент поглощения; I_0 — интенсивность на оси на выходе телескопа; ρ_0 , c_p — плотность и теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Видно, что при постоянном радиусе пучка и длине трассы параметр N_c зависит от поглощенной энергии ($\alpha I_0 L^2$), определяющей нагрев канала, и скорости выноса тепла из канала V_\perp . Для фокусированных пучков и однородного ветра основную роль играет степень фокусировки — a/a_f .

Анализ зависимости плотности энергии в максимуме для *квазинепрерывного излучения* в конце трассы от параметра нелинейности N_c (рассчитанного как сумма параметров на участке ввода и атмосферной трассе) показал, что наблюдается явно выраженная тенденция уменьшения относительной плотности энергии в максимуме более чем в 3–5 раз при изменении N_c от 0,3 до 2,5. Большой разброс экспериментальных данных, выходящий за пределы ошибок эксперимента при значениях $N_c < 1$, когда сравнимы вклады атмосферного участка $N_c^{\text{ат}}$ и участка ввода N_c^i , указывает на то, что простое арифметическое сложение параметров нелинейности не совсем корректно для описания влияния всей трассы и каждый из участков необходимо учитывать со своим весом. Отметим также, что среднее распределение энергии в сечениях пучка, проходящих через точку максимальной плотности, близко к гауссову, несмотря на сложную форму исходного пучка и оптической системы.

На рис. 2 приведены зависимости измеренного радиуса пучка a_e , нормированного на дифракционный радиус a_d , и нормированной мощности для *непрерывного излучения* CO₂-лазера, от параметра нелинейности.

Параметр $N_d \approx N_c a/a_d$ рассчитывался для дифракционного пятна радиуса $a_d = 0,61\lambda L/a$, т.е. $a_f = a_d$. Сплошными линиями (1) показаны зависимости a_e/a_d , и w_m/w_d , построенные по аппроксимационной формуле $A(1 + N_c^b)$ [4], где A и b — константы. Пунктирные кривые (2) — экспоненты, подобранные методом наименьших квадратов. Видно, что w_m/w_d и a_e/a_d хорошо описываются как аппроксимационной формулой, так и более простой экспоненциальной зависимостью.

Полученные экспериментальные данные позволяют провести оценку регулярной расходимости θ (радиуса фокусированного пучка a_e) за счет естественных флуктуации поля источника, которые опре-

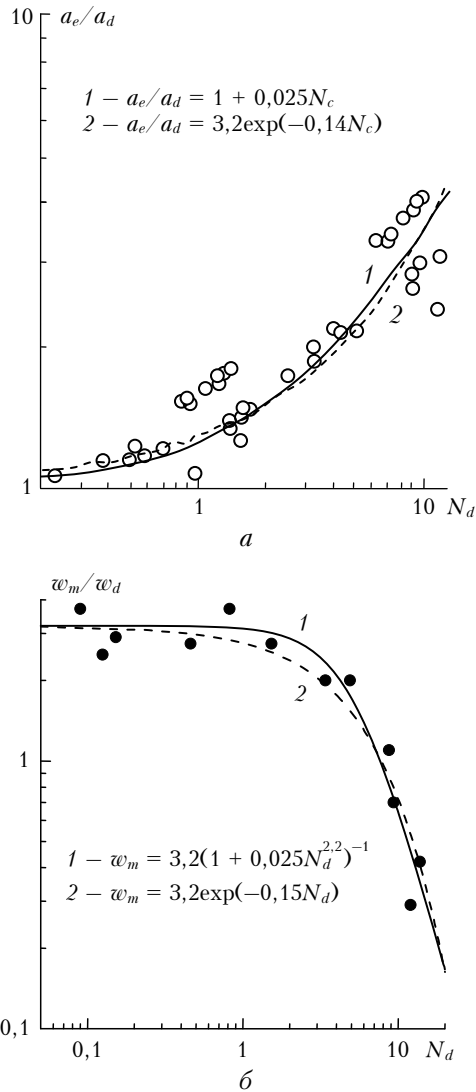


Рис. 2. Зависимость нормированного радиуса пучка непрерывного излучения от N_c [13] (а) и нормированной мощности в максимуме, зарегистрированной ячейкой матрицы, от дифракционного параметра нелинейности (б)

деляются дисперсией флуктуации фазы и радиусом когерентности. Как показывают оценки N_c , в экспериментах [13] тепловые искажения пучка преобладали. Уменьшение интенсивности на оси пучка до уровня $e^{-1}I_0$ должно происходить при значении $N_c \approx 1$ [4]. Из рис. 2, б видно, что w_m/w_d при $N_d = 10$ примерно в e раз меньше, чем при $N_d = 0$. Из формулы $N_c = N_d(a_d/a)$, следует, что $a_d/a \approx 10$, т.е. радиус пучка a_e за счет регулярной расходимости при фокусировке излучения в десять раз больше дифракционного $a_e = 10a_d$ ($\theta = 10\theta_d$) что согласуется с результатами стендовых измерений. Оценка расходимости излучения по размеру пятна на матрице, когда атмосферные искажения мощного пучка были минимальны, т.е. $N_c \approx 0$, дает такую же величину.

Анализ дефокусировки пучка квазинепрерывного излучения [11, 12] проводился с использованием данных о площади пучка в плоскости приема на уровне 0,5 от максимального значения энергии.

Показано, что для длительного воздействия МЛИ на среду распространения (непрерывное и квазинепрерывное излучение) необходимо учитывать направление и скорость ветра на трассе.

На рис. 3 приведена зависимость относительной угловой расходимости пучка θ/θ_0 на атмосферной трассе от времени (θ_0 — начальная расходимость).

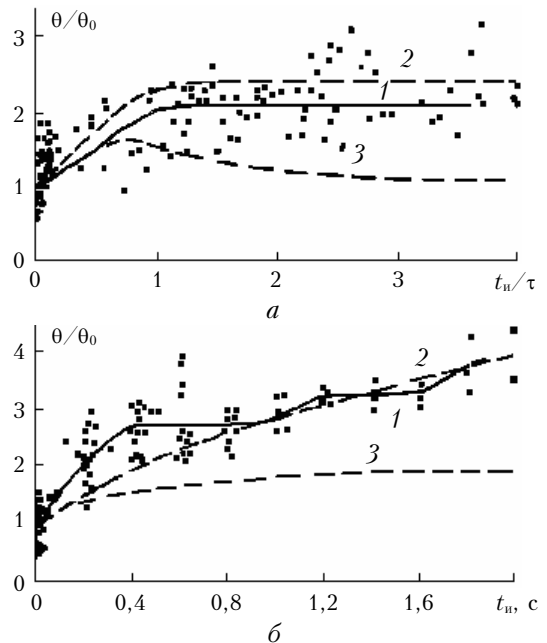


Рис. 3

Рис. 3, а соответствует перпендикулярной трассе распространения составляющей скорости ветра $V_{\perp} \geq 1$ м/с, рис. 3, б — $V_{\perp} \approx 0$ м/с. Точками показаны данные эксперимента; 1 — эмпирические кривые, 2 и 3 — расчетные, полученные в безаберрационном приближении для условий $\sigma_V/V_{\perp} = 0$ (кривая 2) и 0,2 (кривая 3). Здесь σ_V — среднеквадратическое отклонение скорости ветра; $\tau = 2a/V_{\perp}$ — время выноса тепла из канала, t_n — время воздействия излучения на среду. Как видно из рис. 3, а, при наличии перпендикулярной составляющей скорости ветра стационарный режим дефокусировки устанавливается при $t_n/\tau > 1$. При малых V_{\perp} или продольном ветре (см. рис. 3, б) размер пучка непрерывно растет. Дефокусировка пучка в этом случае ($t_n \sim 2$ с) может превышать дефокусировку при устойчивом поперечном ветре до 2 раз.

Анализ смещения энергетического центра пучка квазинепрерывного лазера не показал четкой зависимости от V_{\perp} . В то же время в среднем по всем измерениям наблюдается смещение навстречу ветру при $V_{\perp} > 1$ м/с.

Для получения оценок параметров пучков ИК-лазеров квазинепрерывного излучения разработан метод отпечатков (реплик) [17]. Основная идея метода — движение регистрирующего материала во время генерации излучения в поперечном сечении пучка (фактически некий аналог кинокамеры). Соответствующий подбор материала, чувствительного

в определенных диапазонах изменения энергии регистрируемого излучения, позволяет достоверно отображать как распределение энергии по сечению пучка, так и его размеры, и смещение в целом.

Результаты измерений выявили ряд характерных особенностей работы лазера в квазинепрерывном режиме. Обнаружены неустойчивый режим генерации после первых нескольких импульсов и малые размеры пучка при первых импульсах. Наблюдаются достаточно значительные флуктуации размера пучка и положения его центра. По результатам измерений [17] определены динамика расходимости пучка и радиуса кривизны его волнового фронта (рис. 4).

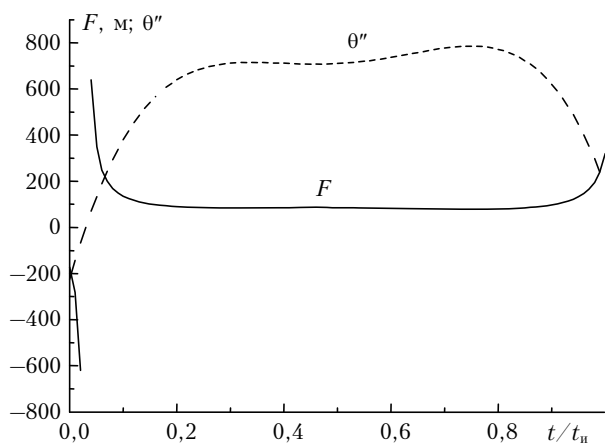


Рис. 4. Изменение во времени расходимости θ и радиуса кривизны волнового фронта F

Видно, что вначале генерируется сфокусированный пучок ($F \leq -200$ м, $\theta \leq -200''$), который при $t/t_n \approx 0,04$ переходит в коллимированный ($F = \infty$, $\theta = 0$) и затем при $t/t_n \approx 0,15$ устанавливается стационарный режим генерации излучения с расходящимся волновым фронтом ($F \approx 86$ м, $\theta \approx 700''$). Такой временной ход расходимости объясняет уменьшенный размер пучка при первых импульсах генерации и неустойчивость генерации в начальный момент времени из-за быстрого изменения эффективного фокусного расстояния резонатора лазера. Изменения F и θ в конце генерации обусловлены в большей степени ошибками аппроксимации. Средняя расходимость пучка, измеренная данным методом, совпадает с результатами стендовых измерений другими методами.

Для импульсного излучения метод реплик в полевых условиях позволил зафиксировать существенное перераспределение энергии по сечению пучка в течение длительности импульса [16]. В качестве материала реплики применялись листы плотного картона, для которого согласно [18] излучение CO_2 -лазера оставляет заметные отпечатки при ~ 2 Дж/см².

Обработка реплик, полученных в фокальной области пучка, показывает наличие выбросов интенсивности размером $\sim 1-3$ мм. Их количество в фокальной области значительно больше таковых в начале трассы. Провести достоверную оценку плотности энергии излучения в мелкомасштабных выбросах не

удалось из-за сильного и разнообразного повреждения ими реплики. Приосевой провал в распределении энергии по сечению лазерного пучка при входе на трассу замывается, и распределение энергии (без учета мелкомасштабных выбросов) приобретает супергауссову форму.

Изложенное выше относится к контактным методам измерения параметров лазерных пучков, когда измеритель или его часть необходимо вводить в объем пучка.

При решении проблемы влияния атмосферных факторов на ослабление лазерного излучения в большинстве случаев рассматриваются задачи теоретического прогноза влияния атмосферы на характеристики тех или иных лазерных систем. Для описания оптических характеристик атмосферы используются их статистические модели, представляющие собой средние распределения для различных регионов или сезонов.

Специфика задачи учета атмосферных факторов при натурных исследованиях мощных лазерных систем состоит в том, что аппаратура и методики, используемые для решения этой задачи, должны обеспечивать диагностику и учет влияния вполне конкретных метеорологических и оптических характеристик атмосферного канала, имевших место в момент проведения эксперимента, без нарушения целостности лазерного пучка. Такая постановка наталкивается на определенные трудности, связанные, в частности, с проблемой оперативной оценки оптических характеристик аэрозолей, не говоря уже о динамике этих характеристик в процессе взаимодействия мощного излучения с частицами аэрозоля [10].

К настоящему времени в литературе накоплено огромное количество экспериментальных материалов по зависимостям микрофизических и оптических характеристик аэрозоля от метеоусловий. Однако для практических задач требуется адекватность этой информации конкретной атмосферной ситуации, что далеко не всегда выполнимо. Как уже упоминалось, коэффициент передачи импульсного излучения CO_2 -лазера на атмосферных трассах зависит от ОМС атмосферы. Наиболее проработаны вопросы взаимодействия излучения с жидкокапельными аэрозольными средами [14, 15, 19, 20]. По результатам работ можно сделать следующие выводы. Комплексные исследования энергетического ослабления МЛИ в реальной атмосфере в условиях туманной дымки, тумана, мороси, дождя [19] и механизмов взаимодействия МЛИ с частицами аэрозоля в контролируемых лабораторных условиях [10] выявили закономерности изменения ослабления излучения, зависящие от микрофизических параметров аэрозоля и энергетических параметров пучка излучения.

В качестве примера проиллюстрируем влияние ОМС на устойчивость T_n от пуска к пуску МЛИ для туманов. Полная повторяемость значений T_n в тумане для различных пусков МЛИ наблюдается при следующих условиях: время существования ОМС $t_{\text{ОМС}} \geq 0,5$ ч; энергия излучения в импульсе $E = \text{const}$; $S_m = \text{const}$; пуски разнесены во времени не более чем на 5 мин. Для серий измерений, выполненных

в различные годы, либо для пусков МЛИ в одной серии, разнесенных на значительное время при фиксированных значениях E и S_m , совпадающие значения T_n наблюдаются при соблюдении дополнительного условия — равенства температур воздуха во время выполнения пусков. Колебания температуры воздуха в пределах 2°C вызывают различия в значениях T_n до $+5\%$.

В [20] предпринята попытка выделить некоторые индикаторные характеристики процесса взаимодействия МЛИ с приземной атмосферой. Показано, что существенная зависимость $T_n(\eta)$ (см. рис. 1, в) при фиксированных параметрах МЛИ указывает на то, что при разработке моделей переноса МЛИ в реальной атмосфере нельзя ограничиваться аддитивным рассмотрением его взаимодействия с газовым и аэрозольным компонентами. Процессы взаимодействия протекают одновременно, обогащая друг друга и конкурируя.

Для слабофокусированных пучков с плотностью энергии при выходе на трассу $0,1 \div 0,2 \text{ Дж/см}^2$ в случае дымки весны и осени наиболее устойчивый прогноз пропускания атмосферой МЛИ возможен при равенстве газового и аэрозольного компонентов ($\eta = 1$). Увеличение вклада того или другого компонента в исходный коэффициент ослабления вносит заметную неоднозначность в оценку T_n . Для острофокусированных пучков с той же плотностью энергии величина ослабления значительно выше и однозначно зависит от величины η . Основной вклад в ослабление вносит аэрозольный компонент.

Для детального анализа взаимосвязанных процессов взаимодействия газового и аэрозольного компонентов с МЛИ необходимо проводить экспериментальные исследования по распространению МЛИ в открытой атмосфере с использованием быстродействующих блоков газоанализа и микроструктуры аэрозоля непосредственно в канале распространения.

При этом сохранение целостности пучка МЛИ может быть обеспечено только дистанционными методами исследования атмосферно-оптического канала. К используемым в настоящее время методам бесконтактной диагностики каналов МЛИ следует отнести определение интегрального пространственно-временного поля показателя преломления среды с помощью зондирующего излучения [21], просвечивающего канал МЛИ, и акустического излучения, генерируемого взаимодействием МЛИ с газовым и аэрозольным компонентами в канале [16].

Особенности построения схем формирования пучков МЛИ требуют введения зондирующего излучения в канал МЛИ под малыми углами. Для прямоугольного сечения канала с равномерным распределением энергии (квазинепрерывное излучение) в [21] показано, что в спокойной атмосфере разрушения канала при длительностях воздействия МЛИ ≤ 1 с не происходит и его можно рассматривать как пластину с показателем преломления, меньшим показателя преломления окружающей среды n на Δn . Методика работы позволяла определять Δn с точностью до седьмого знака после запятой. Ход кривых $\Delta n/\Delta n_{\max}$ и углового размера пучка МЛИ θ/θ_0 за время воз-

действия МЛИ на среду хорошо согласуется при $N_c < 0,5$.

Как правило, на практике форма пучков МЛИ отличается от прямоугольной, а распределения энергии по сечению далеки от равномерного и размеры пучков основного и зондирующего излучений несопоставимы. При этом изменения пространственного спектра флуктуации Δn вызываются взаимодействием МЛИ с аэрозольными частицами с образованием акустических волн плотности [10]. В реальной атмосфере показано [12], что в канале МЛИ существенно возрастает вклад во флуктуации интенсивности зондирующего пучка мелкомасштабных или быстро пересекающих пучков неоднородностей показателя преломления. С увеличением N_c (интенсивности основного излучения) мощность высокочастотных флуктуаций возрастает [12], что объясняется увеличением количества аэрозольных частиц, способных при данной интенсивности МЛИ генерировать акустические волны плотности [10].

Согласно [12] масштабы временной корреляции интенсивности зондирующего пучка и звукового давления совпадают. В обоих случаях четко отслеживается периодичность следования импульсов МЛИ. Имея результаты измерений звукового давления для каждого импульса МЛИ, можно восстановить распределение интенсивности по сечению пучка [7].

Для импульсного излучения CO_2 -лазера экспериментальные исследования оптико-акустического эффекта при изменении фазового состояния аэрозольных частиц в лабораторных и природных условиях [22–25] показали, что параметры генерируемых в канале МЛИ акустических сигналов определяются как характеристиками поглощенного излучения, так и оптическими, теплофизическими и акустическими свойствами поглощающей среды.

Подчеркнем, что основное преимущество оптического способа генерации звука заключается в его дистанционности. Возможность принимать акустический отклик среды при любых азимутальных и зенитных углах направленности оси лазерного пучка лимитируется по дальности в основном уровнем энергии МЛИ, перешедшей в энергию источника звука.

В [16] впервые акустическим методом зарегистрировано «дыхание» лазерного пучка при распространении в реальной атмосфере в условиях оптического пробоя среды на частицах аэрозоля, т.е. акустика позволяет оценить перестройку интенсивности как в поперечном сечении пучка МЛИ, так и вдоль трассы распространения.

2. Структура комплекса исследования распространения МЛИ в атмосфере

На основе изложенных результатов можно заключить, что при распространении в атмосфере происходит энергетическое ослабление лазерного излучения, ухудшается его пространственная когерентность, возникают флуктуации интенсивности, случайные и рефракционные смещения, в том числе за счет теплового самовоздействия при большой мощности.

Все эти явления снижают точность и энергетический потенциал систем, предназначенных для работы в атмосферных условиях. С другой стороны, сами лазерные источники, оптические элементы формирования оптических пучков являются несовершенными в техническом отношении и также оказывают искажающее влияние на лазерное излучение. Для оценки и разделения вкладов технических и атмосферных факторов в искажения лазерного поля важно знать как атмосферные условия распространения лазерного излучения, так и параметры лазерного пучка. Именно вопросы контроля параметров атмосферы и лазерного пучка во время исследований определяют структуру комплексов аппаратуры.

Известно, что наибольшей мощностью обладают лазеры с длинами волн: 1,06; 2,6–3,05 (HF), 3,8–4,01 (DF), 5–6,6 (CO), 9,1–11 мкм (CO₂) и др. [26]. При исследованиях распространения излучения лазеров в атмосфере особое внимание необходимо обращать на диапазон длин волн излучения и стабильность распределения энергии по спектру, сравнение с линиями (полосами) поглощения излучения атмосферными газами. В частности, в лазерах HF, DF и CO происходит непрерывная перекачка энергии между линиями и полосами генерации, что приводит к изменению спектрального состава излучения и распределению энергии по спектру во время генерации. Поэтому рассчитать и даже оценить по метеоданным энергетическое ослабление и влияние нелинейных эффектов на параметры пучка практически невозможно без знания реального спектрального состава излучения и микрофизики его взаимодействия с компонентами атмосферы.

Исходя из анализа влияния атмосферы на распространение излучения, включая мощное, а также характеристик излучения лазеров различного типа (сложность спектрального состава, режим работы — импульсный, частотно-импульсный или непрерывный), предлагается включать в состав трассового измерительного комплекса 2 блока измерителей.

Блок 1, предназначенный для измерения условий распространения, в составе:

- измерителя аэрозольного ослабления атмосферой (ФИ-03) — регистратор дальности видимости;
- устройства оперативного измерения метеопараметров на базе автоматизированного акустического метеокомплекса (АМК) — 2 шт.;
- измерителя концентрации и распределения частиц аэрозоля;
- трассового дифференциального измерителя турбулентности атмосферы — ДИТА;
- системы регистрации информации на базе компьютеров.

Блок 2, предназначенный для измерения параметров лазерного пучка, в составе:

- измерителя энергии и мощности излучения широкопертурных пучков;
- измерителя распределения излучения на базе тепловизионной системы;
- измерителей спектрального состава излучения;
- системы регистрации информации на базе компьютеров.

С учетом возможности применения такого комплекса на различных стендах и трассах предлагается выполнить его в мобильном варианте, размещая аппаратуру в двух автомобилях типа «Газель». В одном автомобиле (мобильная станция МС-1) размещается аппаратура блока 1, во втором (МС-2) — аппаратура блока 2. Такое решение позволяет, при необходимости, использовать каждый автомобиль независимо. Кроме того, решаются основные вопросы: размещение и транспортировка операторов, быстрое время развертывания и демонтажа оборудования, обеспечение его сохранности.

Каждая мобильная станция состоит из двух модулей:

- 1) стационарного — аппаратура и блоки, входящие в состав станции, устанавливаемые стационарно;
- 2) выносного — аппаратура и блоки, входящие в состав станции, демонтируемые из автомобиля и размещаемые на трассе на время измерений. Расстояние от станции до измерительной аппаратуры — до 50 м.

К каждой станции предусматривается прицеп для транспортировки металлоконструкций, необходимых при монтаже оборудования на трассе.

Каждая станция укомплектовывается:

- системой автоматического поддержания температуры (автомобильный кондиционер, нагреватель);
 - системой энергоснабжения, которая устанавливается в прицепах и включает: 2 маломощных генератора автономного электропитания (мощностью 3 кВт каждый) — один для работы аппаратуры, второй — для освещения и работы системы автоматического поддержания температуры; распределительный электрический щит; выносную систему освещения (при работе в ночных условиях), кабельные сети. Предусматривается возможность энергоснабжения от внешнего источника или от одной из станций;
 - беспроводной и проводной системами связи.
- Состав аппаратуры может изменяться в зависимости от конкретных требований.

1. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Сов. радио, 1970. 496 с.
2. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
3. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере. М.: Сов. радио, 1977. 368 с.
4. Смит Д.К. Распространение мощного лазерного излучения. Тепловое искажение пучка // ТИИЭР. 1977. Т. 65. № 12. С. 59–103.
5. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
6. Миронов В.Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1981. 246 с.
7. Воробьев В.В. Тепловое самовоздействие лазерного излучения в атмосфере. Теория и модельный эксперимент. М.: Наука, 1987. 200 с.
8. Аксенов В.П., Банах В.А., Валуев В.В., Зуев В.Е., Морозов В.В., Смалыхо И.Н., Цык Р.Ш. Мощные лазерные пучки в случайно-неоднородной атмосфере / Под ред. В.А. Банаха. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. 341 с.
9. Зуев В.Е., Копытин Ю.Д., Кузиковский А.В. Нелинейные оптические эффекты в аэрозолях. Новосибирск: Наука, 1980. 184 с.

10. Гейнц Ю.Э., Земляное А.А., Зуев В.Е., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Нелинейная оптика атмосферного аэрозоля. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 260 с.
11. Банах В.А., Карасев В.В., Коняев Ю.А., Сазанович В.М., Цвык Р.Ш. Дефокусировка лазерного пучка в условиях теплового самовоздействия // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6. № 12. С. 1551–1556.
12. Банах В.А., Сазанович В.М., Цвык Р.Ш. Экспериментальные исследования распространения мощного излучения на атмосферной трассе // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8. № 3. С. 467–478.
13. Valuev V.V., Duhin M.N., Konayev Yu.A., Morozov V.V., Tsvyk R.Sh. The influence of atmosphere on power density distribution and divergence of continuous CO₂-laser wide-aperture beam // Proc. Lasers'96. Portland. 1996. V. 2201. P. 1395–1408.
14. Гейнц Ю.Э., Земляное А.А., Погодаев В.А. Об интегральной прозрачности каплевидных сред для импульсного излучения CO₂-лазера // Оптика атмосфер. 1989. Т. 2. № 9. С. 948–953.
15. Погодаев В.А. Прозрачность приземной атмосферы для излучения импульсного CO₂-лазера: условия стабильности коэффициента пропускания // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 10. С. 1133–1138.
16. Бочкарев Н.Н., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Пространственная самокоррекция пятнистой структуры излучения мощных импульсных лазеров при оптическом пробое на атмосферных трассах // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21. № 9. С. 809–815.
17. Карасев В.В., Коняев Ю.А., Сазанович В.М., Цвык Р.Ш. Измерение параметров пучков ИК-лазеров // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 4. С. 397–400.
18. Хирд Г. Измерение лазерных параметров (Экспериментальные методы оптической квантовой электроники): Пер. с англ. / Под ред. Ф.С. Файзулова. М.: Мир, 1970. 540 с.
19. Бочкарев Н.Н., Гейнц Ю.Э., Земляное А.А., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Оперативная оценка ослабления мощного излучения импульсного CO₂-лазера на приземных атмосферных трассах // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 7. С. 700–707.
20. Погодаев В.А. Прозрачность приземной атмосферы для излучения импульсного CO₂-лазера // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6. № 4. С. 339–344.
21. Карасев В.В., Коняев Ю.А., Сазанович В.М., Цвык Р.Ш. Измерение показателя преломления в зоне воздействия мощного лазерного излучения // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6. № 4. С. 386–391.
22. Ахтырченко Ю.В., Бочкарев Н.Н., Высоцкий Ю.П., Гарин О.В., Зуев В.Е., Копытин Ю.Д., Красненко Н.П., Курянин А.М., Миронов В.Л., Погодаев В.А., Покозов В.В., Сидоров Б.Г. Диагностика параметров плазмы оптического пробоя атмосферы по акустическим измерениям // VIII Всесоюз. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы: Тезисы докладов. Томск, 1984. Ч. 2. С. 114–118.
23. Бочкарев Н.Н., Земляное А.А., Красненко Н.П., Погодаев В.А., Рождественский А.Е. Акустический отклик аэрозольной среды при импульсном оптическом воздействии // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 44. Вып. 1. С. 25–29.
24. Бочкарев Н.Н., Гейнц Ю.Э., Земляное А.А., Кабанов А.М., Красненко Н.П. Режимы генерации звука жидкокапельным аэрозолем различного типа под действием лазерного излучения // Оптика атмосфер. 1988. Т. 1. № 10. С. 111–112.
25. Бочкарев Н.Н., Красненко Н.П., Сорокин Ю.М. Оптоакустические эффекты в аэрозолях // Оптика атмосфер. 1990. Т. 3. № 6. С. 563–578.
26. Справочник по лазерам. Т. 1: Пер. с англ. / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. 504 с.

V.A. Banakh, V.V. Zhmylevskii, A.B. Ignat'ev, V.V. Morozov, V.A. Pogodaev, R.Sh. Tsvyk. Measuring systems for investigation of laser radiation propagation along atmospheric paths.

The results of long-term experimental investigations of laser radiation propagation along atmospheric paths are presented. Structure of the unified specialized system, based on the experience of developing and *in situ* operation of research equipment models, microphysical *in vitro* modelling of dynamics of interaction processes between laser radiation and atmosphere components, is described.