

Мощные мобильные химические лазеры

А.С.Борейшо

Рассмотрены перспективы размещения непрерывных химических лазеров (НХЛ) – по-прежнему самых мощных источников лазерного излучения, обеспечивающих наиболее высокую энергетическую эффективность и хорошее оптическое качество пучка, на мобильных носителях. Обсуждаются возникающие при этом технологические проблемы, в результате решения которых и формируются реальные технические характеристики мобильных автономных лазерных систем. Показано, что технические характеристики реальных лазеров должны отражать особенности их установки и эксплуатации в условиях, весьма отличных от условий научных лабораторий, где продолжается их исследование.

Ключевые слова: непрерывные химические лазеры, мобильные лазерные системы, распространение лазерного излучения.

1. Введение

В последние десятилетия непрерывные химические лазеры (НХЛ) привлекают наиболее пристальное внимание как гражданских и военных заказчиков, так и разработчиков новой техники в качестве наиболее перспективных источников мощного лазерного излучения.

В 1970-е–80-е годы газодинамические CO_2 -лазеры (ГДЛ) мегаваттной мощности, разработанные в СССР [1] и США, впервые позволили практически проверить и оценить масштабность и сложность технологических проблем создания лазерного оружия. Однако большая длина волны излучения (10.6 мкм) и, следовательно, высокая расходимость лазерного пучка и низкая энергетическая эффективность лазерных источников оказались слишком серьезными техническими препятствиями для конкуренции мобильных систем на основе CO_2 -ГДЛ с традиционными видами вооружений.

Тем не менее эти работы стали сильнейшим стимулом для ускорения развития систем управления и информационных технологий и заложили условия для их беспрецедентного прогресса в последующие десятилетия.

1980-е годы – настоящее время. Непрерывные химические HF(DF)-лазеры (НХЛ) открыли пути для продвижения практически по всем технологическим направлениям, обеспечив значительный рост эффективности лазеров и уменьшение длины волны. Излучение HF-НХЛ (диапазон длин волн 2.7–3.1 мкм) сильно поглощается атмосферой, тогда как излучение DF-НХЛ (3.6–4.1 мкм) практически полностью попадает в окно прозрачности. В связи с этим HF-лазеры могут рассматриваться только для внеатмосферных применений, в то время как DF-НХЛ привлекательны в наземных условиях.

А.С.Борейшо. Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф.Устинова, НПП «Лазерные системы», Россия, 198005 С.-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1; e-mail: savin@lssystem.ru; web-site: www.lssystem.ru

Поступила в редакцию 20 июля 2004 г., после доработки – 13 января 2005 г.

Разработанные в США экспериментальные образцы HF(DF)-лазеров мощностью несколько мегаватт, оборудованные крупногабаритной оптикой (около полутора метров в диаметре), уже позволили провести эффективные испытания, которые продемонстрировали зрелость лазерных, оптических, электронных и информационных технологий, позволяющих решать многие практические задачи в полном объеме.

Конкретной целью работ было создания глобальной системы лазерного оружия космического базирования, основанной на использовании установленных на спутниках мощных химических лазеров на фтористом водороде (HF) «Альфа» и предназначенной для поражения баллистических ракет на активном участке траектории.

Совместный американско-израильский проект «Наутилус» активно обсуждается с середины 1990-х годов. Он базируется на системе, в которую входит DF-НХЛ мощностью около 400 кВт. Основная задача этого проекта – поражение неуправляемых ракетных снарядов типа «Катюша».

В настоящее время можно отметить рост числа обсуждаемых и активно реализуемых проектов DF-НХЛ наземного применения, расширяющий их географию.

Начиная с девяностых годов прошлого века стал активно развиваться еще один тип НХЛ – химические кислородно-иодные лазеры (КИЛ). Длина волны излучения КИЛа ($\lambda = 1.315$ мкм) приходится на окно спектральной прозрачности атмосферы, а также соответствует рабочему диапазону волоконной оптики. Это означает отсутствие принципиальных ограничений на использование лазеров такого типа в различных атмосферных и внеатмосферных условиях. Малая длина волны обеспечивает уменьшение дифракционного предела, а небольшая плотность активной среды в резонаторной полости – высокое оптическое качество лазерного пучка. Поэтому апертура зеркал КИЛа, обеспечивающая такую же, как и HF(DF)-лазеры, плотность излучения на цели, может быть в несколько раз меньше.

Проект Airborne Laser (ABL) состоит в размещении КИЛа, предназначенного для поражения баллистических

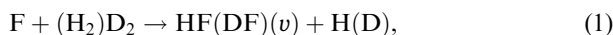
ракет на активном участке траектории, на борту широкофюзеляжного самолета (Боинг 747-400F). Другой возможной задачей боевого применения этого комплекса является поражение спутников на околоземной орбите.

В последние годы обсуждается новая концепция «Перспективный тактический лазер» (ПТЛ) на базе КИЛа мощностью 50–75 кВт. Предполагается, что такие системы смогут обнаруживать и поражать на дистанциях 8–25 км множество воздушных и наземных объектов, таких как крылатые ракеты, неуправляемые ракеты и беспилотные самолеты, а также автомашины, пусковые установки ракет, системы наблюдения. ПТЛ будут основаны на тех же технологиях, которые применяются в системе лазера воздушного базирования AVL, но их выходная мощность будет намного меньше.

Налицо новая тенденция – смещение интересов в сторону тактических лазерных систем. Накопленный практический опыт испытаний экспериментальных лазеров приводит к лучшему пониманию их возможностей, расширению перечня потенциальных целей, увеличению диапазона дистанции и к еще большей избирательности и точности воздействия. Все это стимулирует переход от гигантизма лазерных систем первого поколения, определявшегося скорее организационными, чем техническими причинами, к более эффективным и компактным мобильным системам, рассчитанным на более широкое применение.

2. Принцип действия HF(DF)-НХЛ

Принцип работы этих лазеров основан на прямом преобразовании химической энергии в энергию лазерного излучения при быстром смешении сверхзвуковых химически активных потоков окислителя (содержит атомарный фтор, разбавленный в основном нейтральным газом, преимущественно гелием) и горючего (дейтерий) (рис.1). Смешение потоков сопровождается экзотермической реакцией



идущей с образованием колебательно-возбужденных молекул DF, причем выделяющейся энергии хватает для заселения колебательных уровней вплоть до четвертого ($v = 1 - 4$). В результате протекания этих процессов в активной среде лазера формируется существенно неравновесное по отношению к поступательной температуре распределение молекул HF(DF) по колебательным уровням. Это создает благоприятные условия для возникновения частичной инверсии населенностей одновременно

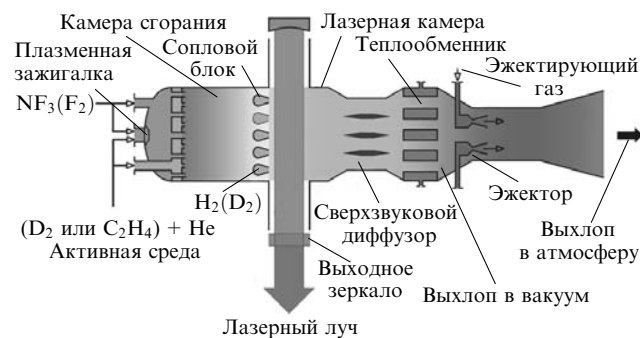


Рис.1. Функциональная схема HF(DF)-НХЛ.

для трех нижних колебательных полос ($1 \rightarrow 0$, $2 \rightarrow 1$ и $3 \rightarrow 2$). Химическая реакция накачки является необратимым процессом, т.е. отработанные продукты реакции должны непрерывно удаляться из газодинамического тракта. Это практически исключает возможность реализации замкнутого режима работы HF(DF)-НХЛ.

Хотя скорость реакции накачки (1) весьма велика, из-за малой скорости смешения сверхзвуковых потоков и, особенно, из-за высокой скорости колебательно-поступательной релаксации возбужденных молекул уровень рабочих давлений в активной среде HF(DF)-НХЛ достаточно низок (как правило, он не превышает 5–10 Тор). С ростом давления уменьшается ширина лазерной зоны, что также лимитирует рабочее давление активной среды.

Низкое давление делает невозможным удаление отработанных продуктов в атмосферу в наземных условиях за счет собственной энергии потока, поскольку даже после торможения в диффузоре давление газа все равно намного меньше атмосферного.

В DF-лазерах, предназначенных для работы в атмосферных условиях, система восстановления давления (СВД) состоит из сверхзвукового диффузора, в котором происходит торможение сверхзвукового потока и переход к дозвуковому режиму течения, холодильника (теплообменника) и газового эжектора, в котором давление повышается до значений, обеспечивающих устойчивую работу в режиме открытого цикла.

В HF-лазере, устанавливаемом на авиационных или космических платформах, сложную и габаритную СВД может заменить устройство удаления отработанной смеси, которое должно обеспечивать минимальное воздействие газов на элементы конструкции лазера и носителя и на их ориентацию в пространстве за счет уравнивания силы тяги истекающих продуктов.

Источником энергии для химического КИЛа служит кислород в синглетном электронно-возбужденном состоянии $O_2(^1\Delta)$. Энергетические характеристики лазера в основном определяются содержанием синглетного кислорода (СК) в активной среде. Сам СК может быть получен различными способами. Наиболее распространенным является химический способ, основанный на реакции хлорирования щелочного раствора перекиси водорода, осуществляемой в генераторах синглетного кислорода (ГСК) (рис.2).

Щелочной раствор перекиси водорода готовится из водных растворов перекиси водорода и щелочи – чаще всего гидроксида калия, т.к. в случае его использования гомогенность жидкого состояния сохраняется в наиболее широком температурном диапазоне. При

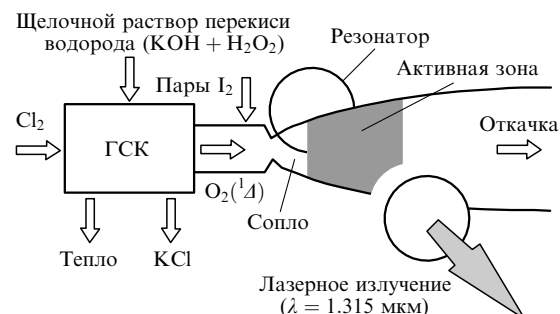
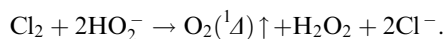
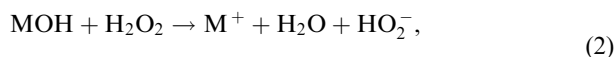


Рис.2. Функциональная схема химического КИЛа со струйным генератором синглетного кислорода.

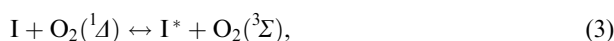
смешивании щелочи и перекиси водорода происходит ряд электролитических реакций, сопровождаемых выделением тепла:



Возбужденное состояние $\text{O}_2(^1\Delta)$ является метастабильным. Радиационное время жизни СК в газовой фазе при отсутствии тушащих примесей превышает 2000 с [2]. Очевидно, что для получения большей мощности необходим большой расход СК, что легче реализуется при сверхзвуковой прокачке.

Газодинамическое охлаждение активной среды в сверхзвуковом сопле создает благоприятные условия для извлечения лазерной энергии. Высокая скорость прокачки среды обеспечивает также растяжение активной зоны по потоку, что приводит к равномерному заполнению излучением апертуры резонатора.

Непосредственно перед резонатором в поток кислорода подмешивают пары иода в смеси с буферным газом. В присутствии СК молекулярный иод диссоциирует на атомы. Затем происходит квазирезонансная передача энергии электронных уровней молекул СК атомам иода,



которые переходят в верхнее возбужденное состояние $\text{I}(^2\text{P}_{1/2})$.

Мощность излучения химического КИЛА можно оценить следующим образом:

$$W_{\text{max}} = \varepsilon \dot{M}_o (Y - Y_{\text{th}}), \quad Y_{\text{th}} = \frac{1}{2K_e + 1}. \quad (4)$$

Здесь W_{max} – потенциально извлекаемая мощность (Вт); $\varepsilon = 90.6 \times 10^3$ Дж/моль – энергия одного моля атомов $\text{I}(^2\text{P}_{1/2})$; \dot{M}_o – молярный расход кислорода на выходе ГСК (моль/с); Y – выход СК; Y_{th} – пороговая доля СК (доля СК, начиная с которой коэффициент усиления слабого сигнала становится положительным); $K_e = 0.75 \times \exp(402/T)$ – константа равновесия реакции обмена энергией электронных уровней молекул СК и атомов иода; T – температура активной среды в кельвинах. Резонатор, как и в HF(DF)-НХЛ, расположен поперек потока.

Отработанная смесь состоит из кислорода, паров воды, паров иода, буферного газа (гелий, аргон, азот) и небольшого количества неутрализованного хлора. Низколетучие пары иода и остаточный хлор утилизируются в криогенной ловушке. В результате отработанная смесь практически представляет собой буферный газ с небольшой примесью кислорода. Поэтому, в отличие от HF(DF)-НХЛ, ее выброс в атмосферу не представляет опасности для окружающей среды.

Основными частями КИЛА, определяющими конструктивный облик и оказывающими влияние на его работу, являются [3, 4]: системы подготовки и хранения компонентов, в которых происходит подготовка щелочного раствора перекиси водорода, хлора и молекулярного иода, генератор СК, сверхзвуковой смесительный сопловой блок, обеспечивающий смешение синглетного кислорода с молекулярным иодом и формирование сверхзвукового потока активной среды, резонаторная полость, оптиче-

ский резонатор и СВД, обеспечивающая работу лазера в атмосфере.

При не слишком больших расходах активной среды существует реальная возможность эксплуатации КИЛА в наземных условиях в режиме замкнутого цикла с помощью технологии криосорбции. По этой технологии газообразные продукты поглощаются охлажденным сорбентом, имеющим развитую поверхность (например, цеолитом). Восстановление сорбента путем его нагревания, вакуумирования и последующего охлаждения приводит к выделению поглощенных газов и возвращает систему в исходное состояние.

3. Получение активной среды

Для работы HF(DF)-НХЛ требуется большой набор исходных компонентов: трифторид азота (NF_3), этилен (C_2H_4), гелий (He), дейтерий (D_2), охлаждающая вода – для генератора активной среды (ГАС), кислород (O_2), этиловый спирт ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) и вода (H_2O) – для генератора эжектирующего газа (ГЭГ); для защиты зеркал оптического резонатора используется вспомогательный компонент – гелий (He). Газообразные компоненты хранятся в баллонах высокого давления.

Схема ГАС показана на рис. 1. В камеру сгорания под давлением в одну атмосферу или более одновременно поступают окислитель (F_2 или NF_3) и первичное горючее (H_2 либо C_2H_4). Использование в качестве окислителя трехфтористого азота NF_3 обусловлено тем, что он обеспечивает определенные преимущества перед фтором при практической эксплуатации НХЛ. Этот газ обладает существенно меньшей агрессивностью и токсичностью, чем молекулярный фтор. Кроме того, смесь первичного горючего и разбавителя, перед тем как поступить в камеру сгорания, осуществляет регенеративное проточное охлаждение ее корпуса (по каналам охлаждения) и форсуночной головки (по каналам в монолитном днище). Электроплазменное зажигательное устройство предназначено для поджига смеси горючего с окислителем на выходе форсуночной головки, поскольку молекулы NF_3 в химическом отношении достаточно инертны и при температурах эксплуатации модуля не образуют (в отличие от F_2) самовоспламеняющихся смесей с H_2 или C_2H_4 .

Охлаждаемый корпус камеры сгорания герметично стыкуется с форсуночной головкой и служит для протекания в камере сгорания реакции горения C_2H_4 с NF_3 . Развивающаяся при этом температура в камере сгорания (1700–1800 К) обеспечивает высокую степень диссоциации избытка NF_3 с образованием атомарного фтора.

Ниже по потоку к сопловому блоку герметично пристыковывается лазерная камера, боковые стенки которой снабжены окнами для вывода лазерного излучения. На входе и выходе лазерной камеры имеются фланцы, с помощью которых она с одной стороны прикрепляется к сопловому блоку, а с другой – к сверхзвуковому диффузору выхлопной системы.

Наиболее важным элементом конструкции ГАС является сопловой блок, представляющий собой прямоугольный корпус с коллекторами подвода вторичного горючего (D_2) и хладагента (H_2O) и с закрепленной в нем сопловой решеткой. В сопловой решетке есть каналы охлаждения и чередующиеся мелкомасштабные сверхзвуковые клиновидные щелевые сопла окислителя и вторичного горючего.

В химическом КИЛе щелочной раствор перекиси водорода подготавливается в специальном баке, оборудованном змеевиком и рубашкой охлаждения. Охлаждение бака необходимо для компенсации тепловыделения в ходе реакции между перекисью водорода и щелочью в процессе приготовления раствора, а также для поддержания его заданной температуры в ходе работы.

В наших экспериментах [4] использовалась перекись водорода с массовой концентрацией около 35 % и раствор КОН, приготовленный из сухой щелочи. Тепловыделение в ходе химической реакции компенсировалось при помощи одноконтурной фреоновой холодильной машины.

Хлор хранится в сжиженном виде в баллоне при нормальной температуре и давлении 6–7 атм. Однако для безопасности эксплуатации лазера снабжение ГСК хлором в процессе работы осуществляется через промежуточную емкость, выполненную в виде эластичного пакета. В пакете хлор хранится при давлении немного ниже атмосферного в объеме, достаточном для проведения серии из трех-четырёх пусков.

Система подготовки паров иода основана на принципе испарения кристаллического иода при нагревании до достижения давления насыщенных паров над поверхностью. Во время проведения эксперимента над кристаллами иода прокачивается азот (вторичный буферный газ). Именно азот и транспортирует иод в сопловой блок к точке смешения с СК.

Вся система испарения иода должна быть надежно теплоизолирована. Внешний нагрев испарителей, нагревателей азота, а также элементов системы, находящихся за испарителями, осуществляется при помощи горячего воздуха.

В КИЛе основным источником рабочей смеси является ГСК, в котором физико-химические процессы протекают при пониженных температурах и давлениях, обеспечивая тем самым неоспоримые преимущества с точки зрения безопасности.

В современных эффективных химических КИЛах используются генераторы струйного типа. Генератор мощностью 15 кВт экспериментальной установки, разработанной в «Лазерных системах» [3] (рис.3), имеет две симметричные реакционные камеры [5]. Газообразный хлор поступает из системы коллекторов через инжекторные отверстия, щелочной раствор перекиси водорода поступает сверху в реакционную камеру также через инжекторные пластины со специальными отверстиями. Раствор подается в виде струй диаметром около миллиметра. Полученный в ГСК кислород выходит через две щели сверху реакционных камер, где к нему подмешивается первичный буферный газ – азот. Именно на таких режимах была достигнута рекордная в мировой практике химическая эффективность

$$\eta_{\text{chem}} = \frac{W}{\varepsilon M_c}, \quad (5)$$

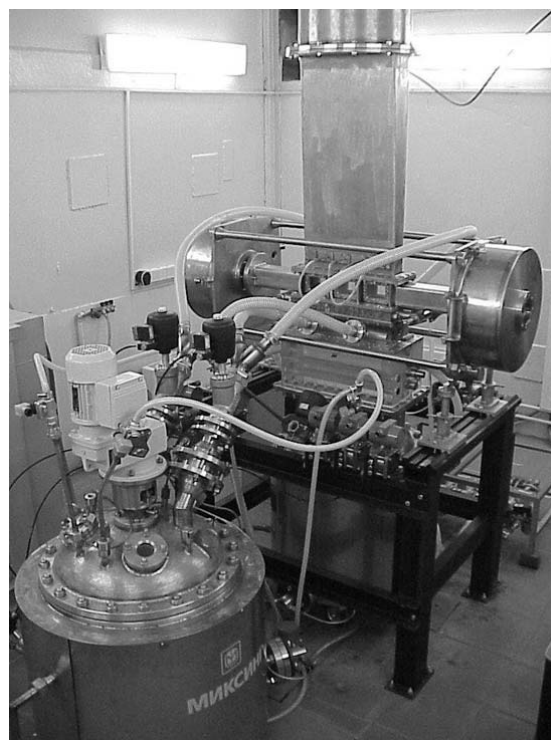


Рис.3. Непрерывный химический КИЛ мощностью 15 кВт («Лазерные системы», С.-Петербург).

составившая 32 % [6]. Здесь ε – энергия одного моля атомов иода; W – мощность лазера (Вт); M_c – молярный расход хлора (моль/с). Отработанный раствор может многократно прокачиваться через ГСК, обеспечивая тем самым практически непрерывную работу лазера.

Сопловой блок представляет собой набор щелевых сопел. Первичный поток (поток СК, разбавленный первичным буферным газом) движется снизу из ГСК и ускоряется в соплах. В критическом сечении каждого сопла имеется инжектор вторичного потока (вторичный буферный газ и иод). Инжектор выполнен в виде двух рядов отверстий. В сопловой лопатке, образующей одну из стенок сопла, также просверлены два ряда отверстий.

В торцах соплового блока установлены специальные боковые лопатки для подачи чистого азота без паров иода. Это необходимо для предотвращения их попадания в резонаторные полости. На выходе из соплового блока поток активной среды попадает в лазерную камеру, которая имеет расширяющийся профиль поперечного сечения для компенсации тепловыделения в потоке активной среды в ходе химических реакций и релаксационных процессов. После лазерной камеры поток идет в сверхзвуковой диффузор, где происходит его торможение и восстановление полного давления.

Свойства исходных компонентов HF(DF)-лазеров и КИЛа, а также процессы получения активной среды и ее преобразования в газодинамических трактах определяют состав и характеристики отработанных газов (табл.1).

Табл.1.

Параметр	Камера сгорания HF(DF)-лазера	ГСК КИЛа	Сопловой блок		Лазерная камера	
			HF(DF)-лазер	КИЛ	HF(DF)-лазер	КИЛ
Давление (Тор)	1000 – 100000	20 – 40	5 – 10	2 – 3	10 – 20	4 – 8
Температура (К)	1600 – 1800	240 – 250	100 – 300	100 – 300	600	200 – 300

4. Утилизация отработанной смеси

Возможности мобильного химического лазера зависят от непрерывного отвода отработанной рабочей смеси, находящейся при давлении от нескольких десятков до нескольких единиц торр. Естественно, что для лазеров космического базирования газодинамических проблем выхлопа в окружающее пространство не существует. Единственной задачей, решаемой в этом случае, должно быть обеспечение минимального воздействия отработанной струи газов на элементы конструкции и компенсации реактивной силы оттекающих струй.

Максимальные сложности возникают для наземных систем. В DF-НХЛ эта задача решается с помощью СВД. К сожалению, использования для выхлопа отработанной смеси только собственной кинетической энергии потока активной среды в случае непрерывных химических лазеров недостаточно. Необходим подвод дополнительной энергии с помощью вакуумных насосов или эжекторов. Последний способ применяется для лазеров большой мощности.

Одним из определяющих критериев эффективности СВД является коэффициент эжекции – отношение расхода продуктов работы лазера и эжектирующего газа. Его величина даже для наиболее «благополучных» DF-лазерных систем не превышает 10 %, тогда как для низконапорных химических КИЛов она может быть на порядок меньше. Отсюда следует, что именно запас компонентов СВД определяет габариты и массу мобильного наземного НХЛ, а значит, оптимизация СВД играет важную роль в проектировании.

При этом необходимо также учитывать практические и эксплуатационные ограничения, условия техники безопасности, стоимостные показатели и т. д. Целесообразно использовать в качестве эжектирующего рабочего тела общедоступные нетоксичные дешевые газообразные вещества или парогазовые смеси. При взаимодействии такого рабочего тела с эжектируемой средой не должны происходить фазовые превращения (например, выделение твердых частиц, конденсация паров и т. п.) или дополнительное выделение тепла, снижающие эффективность эжектора.

Для преодоления этих проблем необходимо установить между диффузором и эжектором СВД теплообменник для охлаждения продуктов сгорания НХЛ. Применение в составе энергоустановки компактного охлаждающего теплообменника с малым гидравлическим сопротивлением проточной части (рис.4,а) также обеспечивает повышение коэффициента эжекции, поскольку при прочих равных условиях он обратно пропорционален корню из температурного фактора:

$$n \sim \sqrt{\frac{\mu}{\theta}}, \tag{6}$$

где $\mu = \mu_2/\mu_1$; $\theta = T_{02}/T_{01}$; $\mu_1, \mu_2, T_{01}, T_{02}$ – молекулярные веса и температуры эжектирующего и эжектируемого газов соответственно.

Применительно к НХЛ для мобильных установок наибольший интерес представляют СВД, в которых используются газовые эжекторы с парогазогенераторами на обычных для ракетной и аэрокосмической техники топливных компонентах. К ним относятся продукты выхлопа авиационного турбореактивного двигателя, продукты

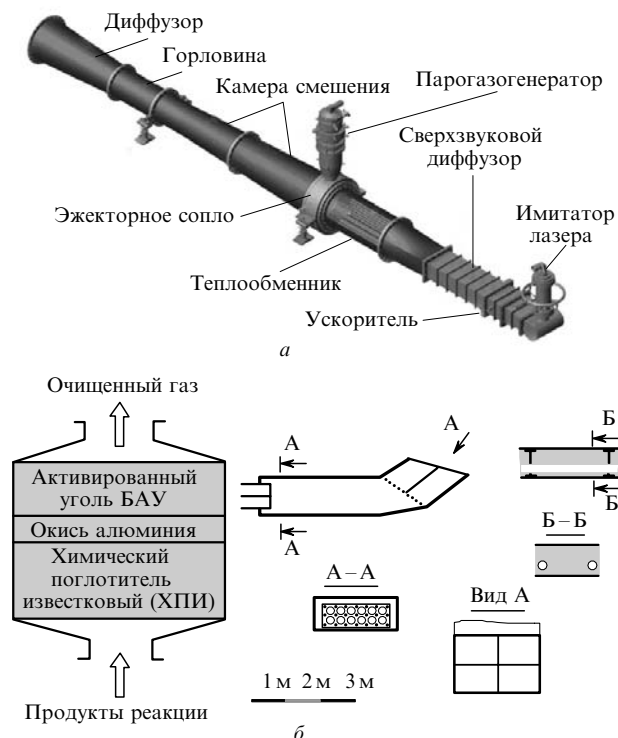


Рис.4. Система восстановления давления для мощного HF(DF)-лазера (а) и схема системы шумоглушения и очистки выхлопных газов (б).

разложения высококонцентрированной перекиси водорода (H_2O_2), генераторный парогаз на основе горения керосина с жидким или газообразным кислородом, балластированный водой, а также генераторный парогаз на основе горения спирта (C_2H_5OH) с газообразным кислородом, балластированный водой.

Из-за низких давлений продуктов выхлопа авиационных двигателей на входе в эжектор коэффициенты эжекции также весьма низки. Это обстоятельство приводит к существенному росту массогабаритных характеристик СВД. В то же время в таких СВД не нужен специальный генератор эжектирующего газа; отпадает также необходимость в хранении запаса окислителя (например, кислорода). Поэтому возможность использования продуктов выхлопа авиационного двигателя в качестве эжектирующего газа должна рассматриваться в каждом конкретном случае [7, 8].

Сравнение различных топливных комбинаций удобно проводить по достижимым значениям коэффициента эжекции (6), поскольку он зависит от молекулярного веса и температуры продуктов реакции. Коэффициент эжекции продуктов сгорания гидразина превышает коэффициент эжекции уже перечисленных генераторных газов в 1.3–1.5 раза, однако продукты сгорания гидразина представляют экологическую опасность.

В стационарных СВД используются парогазогенераторы, работающие на сжигании этилового спирта в воздухе. Это разумно для лабораторных установок, поскольку обеспечивает высокий уровень безопасности на всех стадиях эксплуатации. Недостатком таких СВД является большой объем высоконапорных (до 400 атм) баллонов с воздухом, используемым в качестве окислителя.

Сравнение энергетической эффективности эжекторов, в которых используются различные источники эжектирующего газа, показывает, что независимо от выбора ис-

точника требуемые расходы различаются не более чем на 20 %. Следовательно, предпочтение какому-либо из них может быть отдано лишь очень осторожно, с учетом их эксплуатационных характеристик и экономических показателей [9, 10].

По последним двум критериям наиболее целесообразным является получение эжектирующего газа при сжигании керосина и этилового спирта в воздухе или газообразном кислороде (с последующим балластированием водой), а также при разложении высококонцентрированной перекиси водорода. Технологии использования газообразного кислорода и перекиси водорода хорошо отработаны в течение более чем полувековой эксплуатации подобных систем в газогенераторах испытательного оборудования и в реальных изделиях.

Основным достижением «Лазерных систем» в области СВД химических лазеров являются уникальные компактные высокоэффективные одноступенчатые эжекторы, способные работать на рекордно высоких перепадах давления [10], достаточных для запуска даже более низконапорных, чем DF-лазеры, кислородно-иодных лазеров.

Большой проблемой использования DF-лазера в наземных или атмосферных условиях является обеспечение экологической безопасности. Это связано, с одной стороны, с применением в качестве исходных рабочих компонентов топлива токсичных соединений (F_2 , NF_3), а с другой стороны – с наличием в составе продуктов реакции токсичных веществ (F_2 , HF , DF), которые перед выбросом в атмосферу необходимо нейтрализовать. С этой целью газодинамический тракт лабораторных лазерных установок оснащен специальной системой нейтрализации, работающей либо на основе «сухого» способа (с помощью дегазационных аппаратов с сухой засыпкой), либо с помощью химических насосов.

Устройства, в которых реализуется «сухой» метод дегазации, состоят из аппаратов с трехслойной засыпкой (рис.4,б). Первый по ходу движения продуктов реакции слой – природный известняк либо химический поглотитель известковый (ХПИ). Степень очистки, достигаемая на первом слое, составляет 99 %. Расход ХПИ на связывание 1 кг HF составляет 2.5 кг. Второй слой – алюмогель (Al_2O_3), который поглощает влагу, выделяющуюся в ходе реакций, для предотвращения спекания засыпки и образования плавиковой кислоты. В третьем слое (активированный уголь БАУ) происходит доочистка газов до содержания 3–5 ПДК. Расход БАУ на связывание 1 кг HF – 5 кг. Размер поперечного сечения башни рассчитывается из условия обеспечения скорости течения нейтрализуемых продуктов реакции и составляет 0.02–0.05 м/с. Поэтому реализация всего комплекса газоочистки для мобильных автономных систем вряд ли целесообразна.

Еще одной общей проблемой применения эжекторных СВД является шум, способный достигать весьма значительных уровней (более 120 дБ). Борьба с ним требует использования специальных систем шумоглушения [11], которые можно устанавливать даже на мобильную систему.

Для химических КИЛов кроме эжекторных СВД можно использовать принципиально новые способы откачки, например криoadсорбцию газов на газовых конденсатах [12]. При этом молекулы удаляемого газа соударяются с охлажденной до достаточно низких температур поверхностью адсорбента, вследствие чего они теряют часть

кинетической энергии и в зависимости от условий оказываются связанными с этой поверхностью.

Наибольшее распространение в качестве адсорбента получили цеолиты, представляющие собой алюмосиликаты щелочных или щелочноземельных металлов природного или искусственного происхождения [12, 13].

Герметизированная система выхлопа основана на применении криoadсорбционного насоса – емкости, наполненной охлажденным до криогенных температур цеолитом. Такой тип крионасоса может быть использован повторно путем нагрева цеолита и его нового охлаждения.

В «Лазерных системах» были проведены экспериментальные оценки возможности использования этой технологии в мобильном КИЛе. Замеренные на срезе диффузора параметры оказались весьма перспективными: давление 10 Торр и температура 450 К при расходе газа 350 г/с.

На рис.5 приведены диаграмма работы криoadсорбера КИЛа мощностью 50 кВт, который в наземных условиях должен обеспечить серию из 10 пусков длительностью 5 с с интервалом в 5 с, и компоновка всей криoadсорбционной системы, устанавливаемой на мобильный носитель. Масса цеолита, размещаемого в двух емкостях с размерами $3.5 \times 1.25 \times 1.25$ м, для крионасоса КИЛа мощностью 50 кВт равна 1300 кг.

Мобильная система при движении может испытывать значительные ударные нагрузки, поэтому крионасос должен иметь прочные корпус, а сам цеолит – находиться в каркасе, «подвешенном» на тепловых мостах.

Каркас представляет собой цилиндрическую клетку, собранную из вставленных в перфорированные переборки стеклопластиковых стержней и снаружи и изнутри обтянутую металлической сеткой. Внутри каркаса, заполненного цеолитом, находится змеевик теплообменника, по которому течет хладагент.

В отличие от традиционных применений, предполагающих низкие (менее 10^{-2} Торр) давления и малые расходы адсорбируемого газа, в условиях обсуждаемых лазерных систем скорость адсорбции имеет конечную величину. При этом определяющее влияние оказывают не только микрогеометрические параметры адсорбента, та-

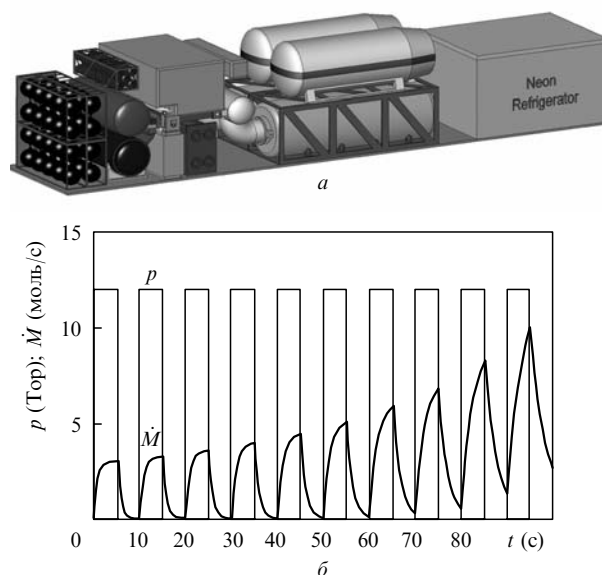


Рис.5. Компоновка криoadсорбционной системы для утилизации выхлопа КИЛа на мобильной платформе (а) и диаграмма работы криoadсорбера (б).

кие как общая площадь поверхности адсорбции и микро-масштаб, но и геометрическая структура адсорбента на всех промежуточных масштабах. Критически важными становятся способ подвода адсорбируемого газа с минимальными потерями давления и способ отвода теплоты адсорбции. Поэтому имеет смысл в качестве основной характеристики адсорбента использовать эмпирический коэффициент α динамической адсорбционной способности. Динамическая адсорбция отработанной активной среды КИЛа описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT}{V} \dot{M} - p \frac{\alpha m}{V}, \tag{7}$$

где p – давление в полости насоса; T – температура цеолита; V – объем насоса; \dot{M} – молярный расход газа; $\alpha = C(1-f)(2\pi\mu_g kT)^{-1/2}$ – коэффициент динамической адсорбции [12] в $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; C – эмпирический коэффициент, зависящий от микрогеометрических характеристик адсорбента; f – степень насыщения поверхности адсорбента; μ_g – молекулярная масса адсорбируемого газа; m – масса цеолита; k – постоянная Больцмана. Первый член в правой части уравнения описывает изотермическое сжатие, второй – динамическую адсорбцию. Аппроксимация экспериментальных результатов решением уравнения (7) дает значение константы $C = 9.8 \times 10^{-3}$.

5. Формирование и вывод лазерного пучка

Этот процесс определяется рядом независимых и взаимозависимых подсистем лазера, таких как резонатор, аэродинамическое окно, телескоп, система управления лазерным излучением.

Резонатор. Оптический резонатор НХЛ предназначен для преобразования энергии активной среды в лазерное излучение и для стабильной генерации лазерного пучка хорошего оптического качества.

При высокой энергетической эффективности коэффициенты усиления активных сред НХЛ сравнительно невелики. И если для сверхмощных систем с активными средами большой протяженности это не создает технических ограничений на выбор оптимальных оптических схем и конструкций резонаторов, то для менее мощных лазеров с ограниченной протяженностью активных сред целесообразно использовать многопроходные схемы резонаторов.

Неохлаждаемые силовые зеркала с минимальным рассеянием изготовлены из кремния, обработанного по специальной технологии «глубокого полирования», на оптическую поверхность которого нанесены многослойные диэлектрические покрытия. Однако использование таких зеркал в двухпроходных схемах может привести к технологическим проблемам и в конце концов – к снижению мощности выходного излучения.

Оптическое качество выходного излучения во многом определяется уровнем оптических неоднородностей в активной среде НХЛ. Относительно низкие рабочие давления в DF-лазерах обеспечивают достаточно высокое оптическое качество активной среды даже при использовании сопловых решеток с турбулизующими соплами. Уровень оптических неоднородностей в таких лазерах (на рабочей длине волны) не превышает $\lambda/50$ на длине активной среды, равной 20 см [9].

Для предохранения зеркал от взаимодействия с агрессивными компонентами активной среды (F, F₂, HF, DF) используют специальные газовые завесы.

Энергосъем в КИЛе выше у DF- лазера, а типичные коэффициенты усиления активной среды – ниже. К тому же из-за более короткой длины волны одинаковая с DF-лазером яркость излучения на цели достигается при значительно меньшей мощности КИЛа. Поэтому излучающий объем активной среды на единицу яркости оказывается для КИЛа меньше, чем для DF-лазера.

С одной стороны, формирование лазерного пучка с малой расходимостью требует большой выходной апертуры резонатора. В результате активная среда может оказаться слишком короткой для достижения высокого энергосъема, и именно она становится критически важным параметром при выборе оптической схемы резонатора. Практически это означает использование многопроходных схем в большинстве перспективных конструкций.

С другой стороны, такие схемы существенно более сложны для юстировки и более чувствительны к вибрациям и другим силовым нагрузкам. Эти проблемы решаются введением в схему двугранных отражателей, что способствует решению еще одной, характерной для всех НХЛ проблемы – неравномерного распределения усиленных свойств активной среды в пределах апертуры.

В оптической схеме неустойчивого резонатора [14], специально разработанного в «Лазерных системах» для мобильного КИЛа (рис.6,а), учитывается большинство из характерных особенностей НХЛ:

– в резонаторе осуществляется выравнивание интенсивности в выходной апертуре за счет использования «переворачивающих» распределение электромагнитного поля двугранных отражателей, число и положение которых согласовано с распределением коэффициента усиления в резонаторной полости;

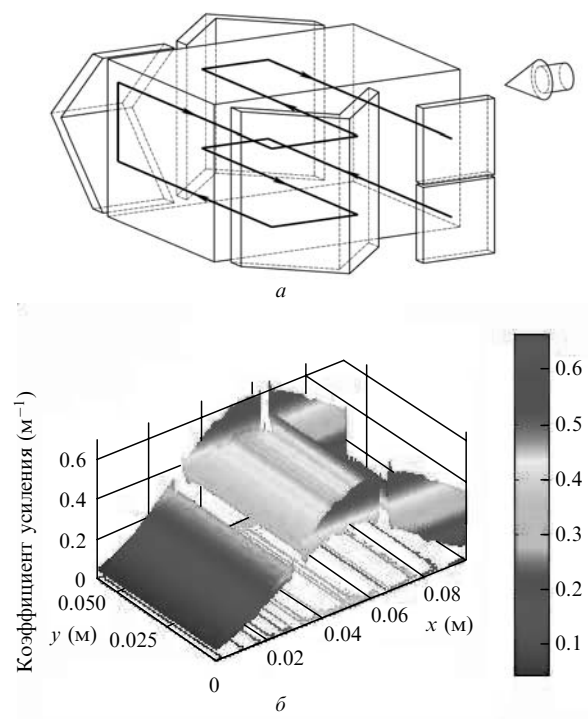


Рис.6. Оптическая схема многопроходного резонатора мощного КИЛа (а) и распределение коэффициента усиления по апертуре для трехпроходной схемы резонатора (б).

– резонатор имеет высокую энергетическую эффективность, т. к. его мода оптимально согласована с распределением усиления в активной среде: излучение за счет переверотов на двугранных отражателях последовательно проходит зоны с высоким и низким коэффициентами усиления, обеспечивая тем самым равномерное распределение интенсивности по апертуре;

– присутствие двугранных отражателей снижает чувствительность резонатора к разьюстировке и вибрациям;

– все проходы по активной среде в данном резонаторе параллельны, что позволяет использовать в нем поляризационные элементы, в частности окна Брюстера для отделения активной среды.

На рис.6,б приведено распределение коэффициента усиления в резонаторе КИЛа, разработанном с применением рассмотренного подхода.

Для контроля мощности лазерного пучка используется ее небольшая (4 %) часть, отведенная от основного излучения. Измеряются интегральная энергия за время генерации излучения и распределение мощности во времени.

Аэродинамическое окно (АДО). Основное назначение окна – вывод лазерного излучения из зоны генерации. Строго говоря, задач две: обеспечение герметичности резонаторной полости и минимальных искажений волнового фронта излучения лазера на выходной апертуре. Для химических КИЛов это сравнительно просто решается с помощью высококачественных прозрачных кварцевых стекол даже для лазеров мегаваттной мощности. В то же время применяемые в длинноволновых DF-лазерах оптически прозрачные материалы имеют неоднородную кристаллическую структуру и более высокие коэффициенты поглощения. Поэтому в DF-лазерах уже при мощностях свыше 100 кВт плотность излучения может превысить критические пороги оптической стойкости используемых материалов.

АДО, в принципе, способно заменить прозрачные материалы и обеспечить надежный вывод излучения практически при любой его плотности в выходной апертуре. Однако ранее считалось, что при степени сжатия более 40 требуются двухступенчатые окна с вакуумной откачкой из второй ступени.

Одноступенчатые АДО нового поколения, разработанные в «Лазерных системах» на основе концепции дифференциальных эжекторов, уверенно работают при степени сжатия, достигающей 100 (рис.7).

Фокусирующий телескоп. Концентрация излучения обеспечивается фокусирующим телескопом, состоящим из зеркального объектива с перемещаемым вторичным зеркалом (рис.8). Главное зеркало телескопа в форме мениска диаметром 502 мм, закрепленное в оправе и являющееся одновременно основанием всего телескопа, устанавливается на оптическом столе. Зеркальный объектив афокальный, выполнен по схеме Мерсена. Узел вторичного зеркала крепится к корпусу при помощи подвеса, который обеспечивает смещение этого узла вдоль оптической оси относительно корпуса при воздействии температурных полей, отличающихся от температур при сборке.

Перестройка фокусного расстояния осуществляется путем перемещения вторичного зеркала. Стабильность положения зеркал в стационарном состоянии обеспечивается термостабилизаторами из инваровых стержней. Диапазон перефокусировки простирается от 500 м до бес-

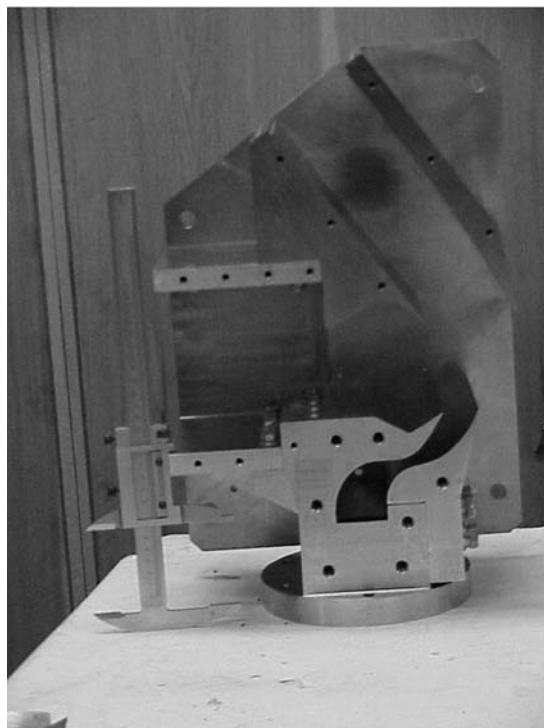


Рис.7. Новое одноступенчатое аэродинамическое окно со степенью сжатия 100 для мощных химических лазеров.

конечности при перемещении зеркала в диапазоне 0–5 мм с точностью ± 0.05 мм.

Системы наблюдения за целью включают в себя телевизионную систему широкого поля зрения, тепловизор и телекамеру точного позиционирования. Телевизионная система широкого поля зрения предназначена для наблюдения за целями и передачи информации в систему позиционирования. Изображение регистрируется матрицей с разрешением 1024×1024 точек. Угол поля зрения камеры составляет 7° , поэтому ее расположение почти полностью определяется конструктивными соображениями. Обычно телевизионная система широкого поля зрения крепится на корпус сканера или телескопа. Ось сис-

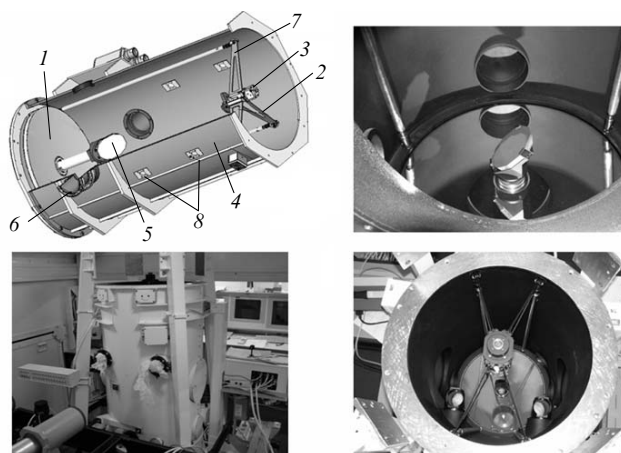


Рис.8. Зеркальный телескоп системы наведения: 1 – главное зеркало; 2 – вторичное зеркало; 3 – механизм перефокусировки; 4 – корпус телескопа; 5 – зеркало углового корректора; 6 – канал ввода излучения; 7 – пилоны; 8 – окна для установки юстировочных элементов.

темы совмещается с осью телескопа с точностью 1 мрад с помощью специального юстровочно-несущего узла.

Тепловизор позволяет визуализировать область наблюдения в условиях слабой освещенности. Телекамера точного позиционирования устанавливается на оптической оси телескопа в зоне, свободной от основного излучения. В качестве объектива телекамеры может использоваться сам фокусирующий телескоп. Это решает задачу совмещения осей камеры и телескопа и уменьшает влияние ветра, однако при использовании внешнего сканера могут возникнуть проблемы, связанных с вращением изображения.

Изображение пятна лазерного излучения на поверхности цели регистрируется матрицей с разрешением

512×512 точек. Поле зрения системы точного позиционирования составляет 7 мрад, что как минимум в 2 раза превышает требуемый угловой размер в зоне использования.

Направлением пучка можно управлять двумя способами (рис.9) [15, 16] – поворотом зеркал, устанавливаемых за неподвижным телескопом (целостат, гелиостат), и поворотом телескопа, закрепленного в специальном подвесе.

Каждый способ имеет достоинства и недостатки, а критическими параметрами оказываются размер апертуры лазера и диаметр главного зеркала телескопа (табл.2).

Окончательный выбор должен определяться всем объемом требований к мобильному комплексу, однако

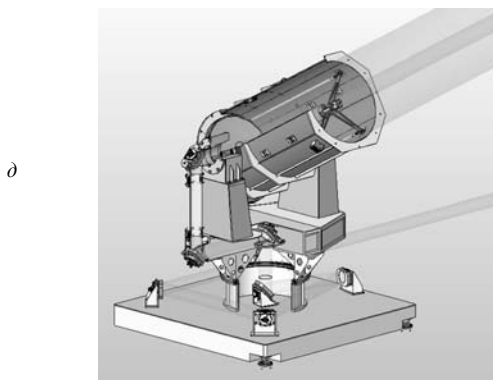
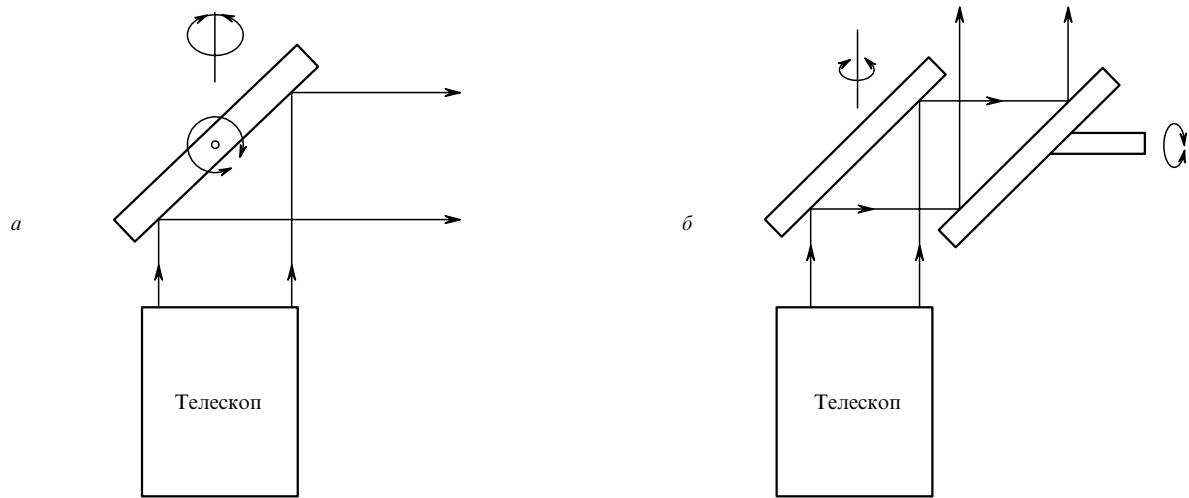


Рис.9. Варианты исполнения сканирующего модуля и системы наблюдения за целью. Схемы гелиостата (а) и целостата (б) с диаметрами 5 м и их внешний вид (в, з) соответственно, а также телескоп в двухосном кардановом подвесе (Ø 0.8 м) (д) и мобильная установка адаптивного формирования и прецизионного управления пучком мощного лазера [16] (е).

Табл.2.

Тип системы	Достоинства	Недостатки
Поворотное зеркало за формирующим телескопом (целостат, гелиостат)	Разделение функций формирования и управления лазерного пучка Пригодна любая форма апертуры Минимальное число высоконагруженных зеркал транспортной оптики для ввода излучения в телескоп Отсутствие ограничений на высоту телескопа	Высокие требования к точности позиционирования управляемого зеркала; требуемая угловая точность позиционирования зеркала в два раза больше точности наведения лазерного пучка Большие размеры плоских зеркал Высокие требования к поворотному зеркалу
Поворачивающийся формирующий телескоп	Широкий угловой диапазон Не слишком жесткие требования к точности позиционирования систем зеркал ввода в телескоп и соответственно к их вибрации Большой технологический опыт разработки подобных схем	Большое количество дополнительных высоконагруженных зеркал для ввода излучения в телескоп Большой момент инерции при вращении телескопа Необходимость использования апертуры только круглой формы.

принципиальные тенденции, обобщенные в табл.2, можно использовать для предварительных оценок.

Поскольку развитие мощных лазеров начиналось с длинноволновых систем, требующих телескопов больших диаметров, то применение в системах управления поворачивающихся телескопов казалось разумным. Однако у КИЛов дифракционный предел существенно ниже, чем у DF-лазеров, поэтому для мобильных систем достаточно полуметровой и даже меньшей по диаметру выводной оптики. А в таком случае неподвижный телескоп со сканером становится весьма привлекательным.

При движении, ударах и вибрациях в процессе эксплуатации бортовая оптика испытывает серьезные нагрузки. Например, ускорения для наземных систем могут достигать $6g$, а для воздушных и космических лазеров они могут быть еще больше. Особенно важным в этом случае оказывается сохранение точности в подвижных узлах телескопа или сканера – самых массивных элементах конструкции.

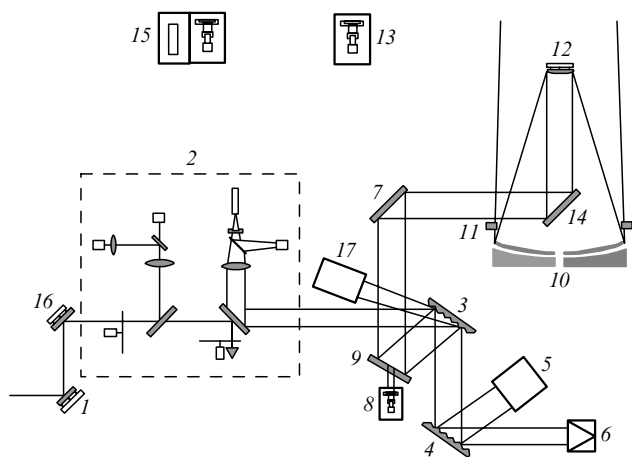


Рис.10. Схема системы формирования и управления излучением лазера с корректором волнового фронта:

1 – зеркало ввода пучка в систему формирования; 2 – блок предварительной юстировки; 3 – решетка-ответвитель пучка; 4 – решетка-ослабитель; 5 – датчик волнового фронта; 6 – измеритель мощности; 7 – поворотное зеркало оптического шарнира; 8 – телевизионная система точного позиционирования; 9 – зеркало с центральным отверстием; 10 – главное зеркало телескопа; 11 – автоколлимационное зеркало; 12 – вторичное зеркало телескопа; 13 – телевизионная система широкого поля зрения; 14 – зеркало углового корректора; 15 – дальномер; 16 – адаптивное зеркало; 17 – датчик волнового фронта излучения, вернувшегося из зоны использования.

Системы точного позиционирования используются в управлении характеристиками лазерного луча для обеспечения требуемой точности направленности лазерного излучения и интенсивности излучения на цели. Элементы системы приведены на оптической схеме системы формирования и управления излучением лазера (рис.10). Основой системы являются зеркало углового корректора линии визирования и адаптивное зеркало коррекции волнового фронта (исправления aberrаций).

Зеркало углового корректора линии визирования предназначено для точного позиционирования лазерного пучка на цели. В общем случае лазер с резонатором и фокусирующий телескоп могут располагаться на разнесенных в пространстве платформах. Здесь возможны динамические отклонения в положении платформ и, следовательно, неприемлемые отклонения оси входящего в систему точного позиционирования пучка. Угловой корректор обеспечивает динамическую стабилизацию направленности лазерного пучка, компенсируя возможные отклонения при его передаче из резонатора и совмещая лазерный пучок с линией визирования телескопа.

Управление зеркалом углового корректора осуществляется с помощью узла крепления на пьезокерамических держателях по сигналам системы управления, анализирующей данные телекамеры точного позиционирования линии визирования телескопа. Применение зеркала углового корректора стабилизирует направленность пучка с точностью до нескольких микроградусов.

Адаптивное зеркало коррекции волнового фронта. Исправление aberrаций осуществляется адаптивным зеркалом. Реальная картина искажений регистрируется двумя датчиками волнового фронта, один из которых предназначен для анализа волнового фронта излучения лазера (датчик Гартмана), другой – волнового фронта, возвратившегося из зоны использования. Вся информация об искажениях волнового фронта совместно обрабатывается системой управления. На адаптивном зеркале происходит коррекция волнового фронта за счет микроперемещений его поверхности, компенсирующая суммарные искажения, измеренные обоими датчиками [17, 18].

6. Распространение лазерного излучения на оперативных дистанциях

Эффективность передачи энергии лазерного излучения определяется следующими факторами:

Табл.3.

Цель	Положение источника		
	Земля	Воздух	Космос
Земля	Земля – земля (приземные горизонтальные трассы)	Воздух – земля	Космос – земля
Воздух	Земля – воздух (источник расположен на уровне моря, цель – на высоте 1–2 км или выше, угол наклона трассы к горизонту более 20°)	Воздух – воздух	Космос – воздух
Космос	Земля – космос (вертикальные трассы длиной более 200 км, источник расположен на уровне моря)	Воздух – космос	Космос – космос

- поглощением и рассеянием;
- молекулярным составом атмосферы;
- характеристиками и концентрацией атмосферного аэрозоля;
- воздействием турбулентности;
- дифракционной расходимостью;
- динамической ошибкой наведения;
- тепловым самовоздействием пучка.

Тепловое самовоздействие пучка лазерного излучения в условиях быстро движущихся целей (и/или носителей!) не играет заметной роли, даже если плотность лазерного излучения может приблизиться к пороговым значениям.

Прогресс в элементной базе систем наведения (моментные двигатели, оптические гироскопы, сигнальные процессоры, а также программные и аппаратные средства моделирования и управления движением) позволяет сегодня построить одноконтурные системы наведения, имеющие настолько малую динамическую ошибку наведения, что этот фактор в действительности тоже перестает быть ограничивающим. Поэтому в настоящее время конкуренция лазерных источников определяется тремя факторами: поглощением и рассеянием в атмосфере, турбулентностью и дифракционной расходимостью.

Суммарная расходимость θ складывается из дифракционной расходимости θ_d , турбулентной расходимости θ_t и учитывает качество пучка β [19]:

$$\theta^2 = \theta_d^2 \beta^2 + \theta_t^2. \tag{8}$$

Пропускание атмосферы определяется следующим образом:

$$T_a = \exp(-GL), \tag{9}$$

где L – расстояние до объекта; G – коэффициент атмосферной экстинкции, равный сумме молекулярного и аэрозольного вкладов в поглощение и рассеяние.

Турбулентность задается формулой

$$\theta_t = 2 \times 2.016 \lambda^{-0.2} (C_n^2 L)^{0.6}. \tag{10}$$

Здесь C_n^2 – структурная постоянная атмосферы. Величина C_n^2 зависит от высоты, времени суток и географического положения [19].

Влияние всех параметров атмосферы, вызывающих ослабление лазерного излучения, быстро уменьшается с увеличением расстояния от поверхности земли. Сочетание этих факторов сильно зависит от геометрии трассы. Выделим девять типов трасс (табл.3).

На горизонтальных приземных трассах ключевую роль играют состояние атмосферы и погода, определяю-

щие ослабление излучения. Для таких трасс преимущество в дифракционной расходимости, которое имеют коротковолновые лазеры, снижается из-за их сильной зависимости от погоды.

Кроме того, «турбулентная» составляющая угла расходимости зависит от длины волны как $\lambda^{-1/5}$, тогда как дифракционная – как λ . Это означает, что в условиях сильной турбулентности для небольших дистанций лазеры с длинноволновым излучением имеют определенное преимущество. Так, например, при низком содержании атмосферной влаги, высокой турбулентности и наличии дымки ($C_n^2 = 10^{-13}$, зима, дымка) облученность мишени СО₂-лазером становится даже выше, чем ее облученность НХЛ.

Однако непрерывно растущие возможности адаптивных оптических систем, способных скомпенсировать влияние атмосферной турбулентности, открывают новые перспективы корректировки волнового фронта и для коротковолнового КИЛа.

Для наклонных трасс, начиная с углов 20° – 30°, влияние приземного слоя становится малым и, следовательно, преимущество коротковолновых лазеров – все более ощутимым. Для больших расстояний предельные возможности концентрации излучения при наличии современной адаптивной оптики определяются только дифракционной расходимостью.

На длинных вертикальных трассах главную роль также играет дифракционная расходимость.

Трассы типа земля – космос зависят от погоды, поэтому лазерные источники лучше размещать в районах с хорошим астроклиматом.

Подъем лазерного источника даже на 1–2 км над уровнем моря кардинально меняет ситуацию. В этом случае содержание аэрозоля резко падает и атмосферная

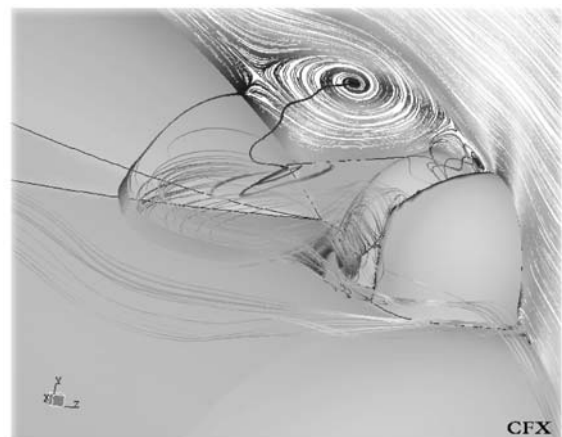


Рис.11. Картина обтекания выходного окна лазерной авиационной системы наведения турбулентным током.

турбулентность практически перестает влиять на прохождение пучка. Для трасс *воздух–воздух* и *воздух–космос* зависимость от погодных условий отсутствует. Главной проблемой становится динамическая ошибка наведения, которая возникает из-за сильных вибраций авиационной платформы и турбулентного обтекания выходных окон лазерной системы (рис. 11). Даже в случае трасс типа *воздух–земля* и *космос–земля* приземный слой не оказывает пагубного влияния на распространение излучения.

Действительно проблемным для распространения мощного лазерного излучения является только приземный слой атмосферы толщиной несколько сотен метров. Таким образом, лазерные системы со сравнительно большими длинами волн могут иметь преимущество лишь на горизонтальных приземных трассах. В то же время сильно зависящая от погоды лазерная система, работающая на горизонтальной приземной трассе, на каком бы типе лазеров она ни была построена, может в какой-то момент оказаться неспособной обеспечить требуемый результат. Это обстоятельство не позволяет считать работу лазеров на горизонтальных приземных трассах реально возможной.

Необходимо также иметь в виду непрерывное техническое совершенствование элементной базы систем позиционирования (моментные двигатели, гироскопы, сигнальные процессоры, а также программные и аппаратные средства моделирования и управления движением) и адаптивных оптических систем. Именно достижения в этих областях позволяют сегодня строить одноконтурные системы наведения там, где раньше приходилось использовать схемы с двумя контурами. При этом такие системы имеют настолько малую динамическую ошибку, что этот фактор, как и многие другие, казавшиеся очень важными, в действительности уже перестают быть серьезным препятствием.

7. Характеристики и возможности носителей НХЛ

Перспективы любых новых систем в большой степени зависят от их способности совмещаться с уже существующими системами. Для мобильной системы это означает возможность ее транспортировки и размещения на стандартных носителях.

Предварительные конструкторские оценки возможных массогабаритных характеристик мобильных автономных НХЛ показали, что лазеры мощностью несколько десятков киловатт, вместе с основными технологическими системами и некоторым запасом компонентов, соответствуют современным транспортным стандартам. Это позволяет разместить лазерные системы на уже существующих наземных и воздушных носителях, используемых для перевозки и эксплуатации крупногабаритного оборудования различного назначения.

Новый военный КАМАЗ-6350 «Мустанг» с колесной формулой 8 × 8 полностью отвечает всем эксплуатационным требованиям как в городских, так и полевых условиях. Конструкция предполагает возможность установки на шасси автономных контейнеров под стандартные условия крепления. При таком варианте размещения габариты устанавливаемого оборудования соответствуют размерам стандартного 20-футового контейнера; максимальная грузоподъемность составляет 10 т. При необ-



Рис. 12. Компоновка КИЛа мощностью 50 кВт с криоадсорбционной системой утилизации и системой наведения.

ходимости оборудование размещается на нескольких автомобилях, как, например, в случае КИЛа мощностью 50 кВт с криоадсорбционной системой утилизации (рис. 12).

К существующим воздушным перевозчикам относятся самый грузоподъемный в мире российский вертолет Ми-26 и наиболее распространенный грузовой самолет Ил-76. Они способны разместить на борту оборудование, габариты и вес которого в несколько раз превышают аналогичные характеристики оборудования, перевозимого наземным транспортом.

8. Опыт разработки мобильных лазерных систем

Если проекты крупномасштабных НХЛ, размещаемых на космических (НФ-лазер) и воздушных (КИЛ) носителях, обсуждаются уже достаточно широко, то о детальных разработках менее габаритных образцов известно много меньше. Тем не менее достигнутый технологический уровень позволяет продвигаться и в этих направлениях.

В известной разработке энергетического модуля мобильного автономного DF-НХЛ с выходной мощностью лазерного луча 300 кВт показано, как применение высокоэффективного топлива (перекиси водорода) позволяет снизить массогабаритные характеристики системы восстановления давления. Так, размеры модуля $9 \times 3.2 \times 3$ м и общий вес 14 т дают возможность легко разместить всю энергетическую часть лазера и СВД на шасси автомобиля с колесной формулой 6 × 6, который способен нести стандартный 40-футовый контейнер весом до 20 т на полуприцепе [9].

На таком же полуприцепе размещается энергетический модуль КИЛа мощностью 50 кВт (рис. 13). Вакуумное оборудование криоадсорбционной системы утилизации отработанных газов увеличивает габариты энергетического модуля по сравнению с высоконапорной СВД DF-лазера. Именно объем криоадсорбера ограничивает мощность лазера (при одинаковом полном времени работы 50 с). К достоинствам этой системы можно отнести отсутствие необходимости в частых дозаправках химическими компонентами. Резонатор лазера имеет независимые виброразвязанные опоры, которые обеспечивают стабильность углового и пространственного положений зеркал в условиях вибраций.

Основной частью системы формирования и управления лазерным излучением является зеркальный телескоп



Рис. 13. Лазерные системы на наземных мобильных носителях.

в поворотном механизме, размещаемый на отдельном носителе. В нем же устанавливаются устройство динамической стабилизации и адаптивная оптическая система. Энергопитание системы формирования и управления осуществляется от отдельно расположенного автономного генератора, чтобы уменьшить нагрузки на устройство динамической стабилизации.

По размерам грузовые отсеки современных тяжелых вертолетов и самолетов (причем не самых грузоподъемных) даже больше наземных носителей. Поэтому КИЛ мощностью 50 кВт может быть размещен в грузовом отсеке (габаритные размеры $12 \times 3.2 \times 3$ м) вертолета Ми-26.

В то же время двигатели воздушных носителей невозможно отключить даже на короткое время, в течение которого происходит лазерная генерация. Поэтому наряду с проблемами турбулентного следа серьезнейшей проблемой становятся колебания конструкции самолета и вертолета. Уровень вибраций в них намного превышает колебания наземных систем, так что технические проблемы обеспечения надежной работы системы формирования и управления лазерным излучением возрастают многократно. Однако они уже были успешно решены для длинноволнового CO_2 -ГДЛ еще в начале 1980-х годов, и сейчас нет оснований сомневаться в успешном решении этих проблем для КИЛа, размещаемого (в рамках проекта AVL) на борту самолета, а при необходимости и на других носителях.

Создание космических лазерных систем также дело недалекого будущего. Самые благоприятные перспективы связаны и с космическими применениями КИЛа. Это единственный из известных сегодня мощных лазеров, который не требует отвода тепла от конструкции, что является серьезным препятствием для космических систем на базе высокотемпературных НХЛ и даже твердотельных лазеров [21].

Размещение НХЛ в космосе снимает самую «неудобную» проблему – необходимость применения СВД для утилизации отработанных газов. Сила тяги, возникающая при их истечении из лазера, компенсируется геометрией конструкции. Российские тяжелые ракетносители «Протон» вполне в состоянии вывести на орбиту крупные элементы лазеров, а масштабы монтажных работ на орбите при строительстве орбитальных станций таковы,

что, по-видимому, сборка космических НХЛ не будет представлять затруднений.

9. Заключение

Опыт развития и внедрения принципиально новых технологий свидетельствует о длительности сроков и большой стоимости каждого этапа разработок и особенно остро ставит вопрос о снижении рисков принятия неправильных решений уже на ранних стадиях реализации проектов.

Достигнутый в последнее десятилетие уровень технологий получения лазерного излучения и быстрый прогресс в развитии элементной базы систем точного позиционирования пучка и адаптивной оптики для исправления аберраций волнового фронта, а также совершенствование программных ресурсов позволяют снять большинство технологических проблем на пути реализации конкретных проектов мобильных автономных НХЛ. Поряду направлений такие работы активно проводятся, а по некоторым проектам они уже достигли фазы испытаний.

В ближайшие годы можно ожидать появления новых концепций применения мощных лазерных систем, что должно сопровождаться уменьшением их мощности и габаритов.

Важную роль в изменениях и диверсификации потенциальных целей лазерных систем военного назначения могут играть также глобальные изменения международной обстановки, вызывающие появление новых целей и новых задач. Все это неизбежно поставит вопросы об обеспечении мобильности и автономности таких систем еще более остро.

Автор выражает искреннюю признательность своим коллегам из компании «Лазерные системы», талантом и самоотверженным трудом которых создается новая техника. Особая признательность А.В.Савину, Д.Н.Васильеву, И.М.Евдокимову и В.М.Малькову за полезные советы и дискуссии при подготовке и оформлении рукописи.

1. Boreisho A.S., Leonov A.F., Malkov V.M., Milityn Yu.A., Moshkov V.L. *Invited Lecture at AIAA-1993 Plasmodynamics & Lasers Conf.* (Orlando, 1993, FL/ AIAA-Paper 93-3166).
2. Дидюков А.И., Кулагин Ю.А., Шелепин Л.А., Ярыгина В.Н. *Квантовая электроника*, **16** (5), 892 (1989).

3. Boreysho A.S., Evdokimov I.M., Vasiliev D.N., Malkov V.M., Savin A.V., Strakhov S.Yu., Trilis A.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5120**, 336 (2002).
4. Борейшо А.С., Мальков В.М., Савин А.В., Васильев Д.Н., Евдокимов И.М., Трилис А.В., Страхов С.Ю. *Квантовая электроника*, **33** (4), 307 (2003).
5. Борейшо А.С., Васильев Д.Н., Гренишен Д.М., Евдокимов И.М., Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Трилис А.В. Патент Российской Федерации № 2182038 от 10.05.2002.
6. Boreysho A.S., Vasiliev D.N., Evdokimov I.M., Malkov V.M., Savin A.V., Trilis A.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5479**, 42 (2004).
7. Даути Дж. *Аэрокосмическая техника*, № 2, 53 (1990).
8. Система восстановления давления (техническое предложение) (С.-Петербург, НПП «Лазерные системы», 2000).
9. Башкин А.С., Безноздрев В.Н., Пирогов Н.А. *Труды научно-технич. конф. НПО «Энергомаш»* (Химки, 2001, с. 15).
10. Мальков В.М., Борейшо А.С., Савин А.В., Киселев И.А., Орлов А.Е. *Теплофизика и аэромеханика*, **8** (4), 625 (2001).
11. Борейшо А.С., Киселев И.А., Орлов А.Е., Савин А.В., Шалимов В.П., Мальков В.М., Хайлов В.М. *Теплофизика и аэромеханика*, **8** (4), 605 (2001).
12. Хефер Р. *Криовакуумная техника* (М.: Энергоатомиздат, 1983).
13. Борейшо А.С., Васильев Д.Н., Евдокимов И.М., Иванов В.И., Савин А.В., Смирнов А.В. Патент Российской Федерации № 2226622 от 05.08.2002.
14. Борейшо А.С., Морозов А.В., Савин А.В. и др. Патент Российской Федерации № 2248076 от 23.12.2002.
15. Boreysho A.S., Chakchir S.Ya., Konyayev M.A., Konovalov K.A., Savin A.V. *36th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conf.* (Westin Harbour Castle, Toronto, Ontario, Canada, 2005).
16. www.raspletin.ru/production/laser/default.php.
17. Alikhanov A.N., Berchenko E.A., et.al. *XI Joint Intern. Symp. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics»* (Tomsk, IAO SB RAS, 2004, p. 41).
18. Kudryashov A.V., Shaml'hausen V.I. *Opt. Eng.*, **35** (11), 3064 (1996).
19. Татарский В.И. *Распространение волн в турбулентной атмосфере* (М.: Наука, 1967).
20. Lamberson S.E. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 1 (2001).
21. Scott W.B. *Aviation Week & Space Technology*, June 7, 2004, pp. 57–59.