

# Проблемы создания автономных мобильных лазерных установок на основе непрерывного химического DF-лазера

Б.П.Александров, А.С.Башкин, В.Н.Безноздрев,  
М.В.Парфеньев, Н.А.Пирогов, С.Н.Семенов

*Рассмотрены проблемы, возникающие при создании автономных мобильных лазерных установок на основе мощных непрерывных химических DF-лазеров, которые могли бы быть по своим массогабаритным характеристикам размещены на разных транспортных средствах. Требование мобильности установки приводит к необходимости уделить особое внимание поиску возможностей снижения массы и габаритов основных систем лазера. Исследованы вопросы оптимизации параметров таких лазеров при различных методах масштабирования их систем. Разработан комплексный подход к анализу оптической схемы лазерной установки.*

**Ключевые слова:** непрерывный химический DF-лазер, оптическая схема лазерной установки, оптимизация параметров лазера.

## 1. Введение

Первые фундаментальные результаты исследований химических лазеров различного типа были получены под руководством Н.Г.Басова в Физическом институте им. П.Н.Лебедева АН СССР [1–3]. По его же инициативе в начале 70-х гг. в НПО Энергомаш были развернуты работы по созданию мощных фтороводородных непрерывных химических лазеров (HF-НХЛ). Выбор данного предприятия был продиктован тем, что его сотрудники имели большой опыт в разработке различных газодинамических устройств и эксплуатации окислителей на основе фтора и фторидов для жидкостных ракетных двигателей. В этих работах участвовали также НПО «Астрофизика» и Государственный институт прикладной химии. К настоящему времени в НПО Энергомаш созданы и исследованы экспериментальные образцы HF-НХЛ с мощностью излучения от нескольких киловатт до 400 кВт.

В последние годы возник интерес к DF-НХЛ, что связано с большим многообразием задач, которые могут быть решены с помощью этого лазера, поскольку его излучение хорошо проходит через приземную атмосферу при различных погодных условиях [4–6]. Возможные применения DF-НХЛ были продемонстрированы при испытаниях лазерных установок MIRACL [7] и THEL [8], сведения о которых, правда, весьма скудны. Область применений DF-НХЛ может быть существенно расширена при обеспечении его мобильности, т. е. при размещении этого лазера на различных транспортных средствах: автомобилях, кораблях, самолетах и т. д. Отсюда понятна цель настоящей работы – опираясь на результаты экспериментальных исследований HF-НХЛ, устройство которых в принципе аналогично устройству DF-НХЛ, рассмотреть перспективы создания автономных мобильных лазерных установок на основе DF-НХЛ различной

мощности с выхлопом отработанных газов в атмосферу. Требование мобильности установок заставляет уделить особое внимание поиску путей максимально возможного снижения их массы и габаритов. Для сравнения характеристик различных вариантов устройства DF-НХЛ было принято, что генерация излучения происходит в течение 50 с.

## 2. Подходы к масштабированию мощности излучения лазера

Принципиальная схема автономного DF-НХЛ представлена на рис.1, где показаны те основные части, которые определяют его автономную работу в условиях окружающей атмосферы: генератор активной среды (ГАС), состоящий из камеры сгорания (с форсуночной головкой), сопловой решетки и лазерной камеры; оптический резонатор; система обеспечения выхлопа, состоящая из сверхзвукового диффузора и газоструйного эжектора с генератором эжектирующего газа (ГЭГ). Поток атомарного фтора, необходимого для осуществления химической реакции накачки  $F + D_2 \rightarrow DF^*(v) + D$  в лазерной камере, создается при горении в камере сгорания смеси  $C_2H_4$  с  $NF_3$ , разбавленной гелием.

Одним из основных путей повышения выходной мощности излучения DF-НХЛ является масштабирование (увеличение) площади среза сопловой решетки ГАС (рис.2). Это можно осуществить двумя способами: при формировании активной среды совокупностью отдельных единичных модулей ГАС или с помощью многосекционной сопловой решетки в рамках единой конструкции ГАС. При реализации обоих способов масштабирования может быть использован опыт разработок HF-НХЛ. В НПО Энергомаш при участии большого коллектива инженеров и исследователей были созданы как среднеразмерный HF-НХЛ с размерами среза сопловой решетки  $100 \times 400$  мм и шагом сопел 7.5 мм (рис.2,а), обеспечивающий при использовании устойчивого резонатора мощность излучения до 30 кВт, так и крупногабаритный HF-НХЛ с девятисекционной сопловой решеткой (шаг

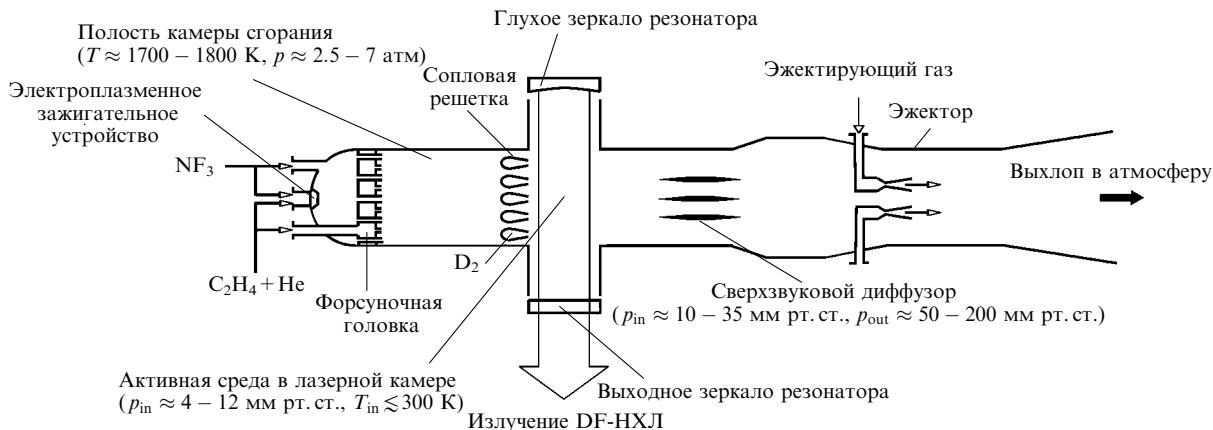


Рис.1. Принципиальная схема DF-НХЛ.

решетки 6 мм, общие размеры среза  $400 \times 9 \times 155$  мм) и выходной мощностью до 400 кВт (рис.2,б). Такое разбиение сопловой решетки по длине на секции, в каждой из которых высота лопаток составляла 155 мм, было связано с невозможностью обеспечения прочности решетки и равномерности истечения водорода в лазерную камеру для лопаток высотой 400 мм при их расположении перпендикулярно оптической оси (см. рис.2,а).

Учитывая результаты этих разработок, рассмотрим проблемы, возникающие при создании автономных мобильных установок на основе DF-НХЛ с различной выходной мощностью и выхлопом в атмосферу. В качестве примера ограничимся тремя вариантами DF-НХЛ, в которых для достижения высокой направленности лазерного излучения используется неустойчивый резонатор (НР):

- 1) на основе одного среднеразмерного модуля ГАС (~ 15 кВт);
- 2) на основе двух сборок ГАС (по четыре среднеразмерных модуля ГАС в каждой), расположенных одна над другой (~ 160 кВт);
- 3) на основе одного крупноразмерного девятисекционного ГАС (~ 300 кВт).

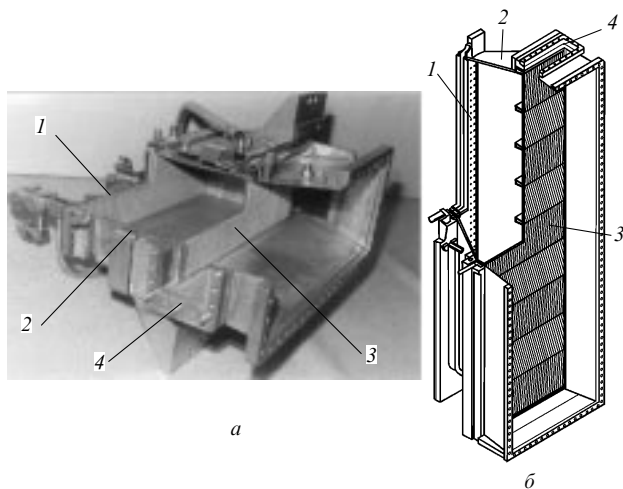


Рис.2. Общий вид ГАС среднеразмерного HF-НХЛ (а) и крупноразмерного HF-НХЛ с девятисекционной сопловой решеткой (б): 1 – форсуночная головка камеры сгорания; 2 – корпус камеры сгорания; 3 – сопловая решетка; 4 – окно лазерной камеры для вывода лазерного излучения.

### 3. Генератор активной среды

Для выбора режима работы ГАС в DF-НХЛ был выполнен комплекс расчетов, в которых интенсивности излучения на различных колебательно-вращательных переходах молекулы DF (1–0, 2–1, 3–2 и 4–3) и газодинамические параметры находились путем самосогласованного решения системы уравнений, описывающих газодинамические и радиационные процессы в активной среде в предположении квазистационарной генерации. Ввиду большого объема вычислений газодинамические расчеты основывались на уравнениях Навье–Стокса в приближении узкого канала [9, 10]. В результате расчетно-теоретического анализа энергетических характеристик DF-НХЛ с учетом эксплуатационных особенностей компонентов топлива была выбрана оптимизированная топливная композиция мольного состава:  $C_2H_4 : NF_3 : He : D_2 = 1 : 6 : 33 : 90$ . Шаг щелевой сопловой решетки был принят равным 6 мм, как в крупноразмерном ГАС. В случае применения такой решетки мы считаем более предпочтительным использовать режим с низким давлением активной среды (~ 4 мм рт. ст.) на входе в лазерную камеру, поскольку он позволяет:

- увеличить протяженность зоны генерации по потоку газов;
- понизить уровень оптических неоднородностей в активной среде;
- уменьшить расход дорогостоящего дейтерия;
- уменьшить количество токсичных продуктов в выхлопных газах лазера.

Заметим также, что выходная мощность излучения при повышении давления от 4 до 12 мм рт. ст. увеличивается очень незначительно (на ~ 10 %).

Выполненные в НПО Энергомаш экспериментальные исследования показали, что совершенствованием конструкции сопловой решетки и подбором состава потоков можно в среднеразмерном НХЛ снизить амплитуду мелкомасштабных фазовых искажений волнового фронта лазерного излучения при прохождении им одного метра активной среды с давлением ~ 4–5 мм рт. ст. до величины не более  $\lambda/50$  [11]. В крупноразмерном девятисекционном ГАС использовался метод самокомпенсации периодических фазовых искажений [12, 13], для чего лопатки были наклонены к оптической оси под углом ~ 5°, а в каждой паре смежных секций знак этого угла менялся на противоположный. В результате амплитуда мелко-

масштабных фазовых искажений в крупноразмерном ГАС на один метр длины активной среды составила  $\lambda/40$  [11]. Следовательно, при использовании в НР многопроходных схем, в которых эффективная длина активной среды DF-НХЛ вдоль оптической оси будет составлять 5–6 м, набегающие при одном проходе пучка суммарные фазовые искажения не препятствуют достижению расходимости излучения, близкой к дифракционному пределу.

#### 4. Особенности оптической схемы лазерных установок

При расчете характеристик лазерной установки нужно учитывать, что оптический резонатор представляет собой лишь часть ее оптической схемы. Для примера на рис.3 приведена упрощенная принципиальная оптическая схема лазерной установки, обеспечивающей эффективное использование излучения на достаточно больших расстояниях. Для предложенных в разд.2 трех вариантов DF-НХЛ на рис.4 приведены принципиальные оптические схемы НР. При расчетах энергетических характеристик для всех вариантов в целях существенного снижения объемов вычислений НР заменялся резонатором Фабри–Перо. Сопоставление результатов расчета для резонаторов обоих типов проводилось при условии равенства их коэффициентов выходной связи:  $1 - r = 1 - 1/M_{\text{res}}^2$ , где  $M_{\text{res}}$  – коэффициент увеличения НР. Такое сопоставление является определенным приближением для оценки выходной мощности излучения лазера с НР, однако характер зависимости мощности от коэффициента выходной связи для НР и резонатора Фабри–Перо будет, по-видимому, тем же самым.

Для первой сопловой решетки наиболее эффективной оказалась схема с Z-образной оптической осью (вариант 1/Z), для второй и третьей решеток были рассмотрены две схемы: двухпроходная (варианты 2/2 и 3/2) и четырехпроходная (варианты 2/4 и 3/4) (здесь и в дальнейшем

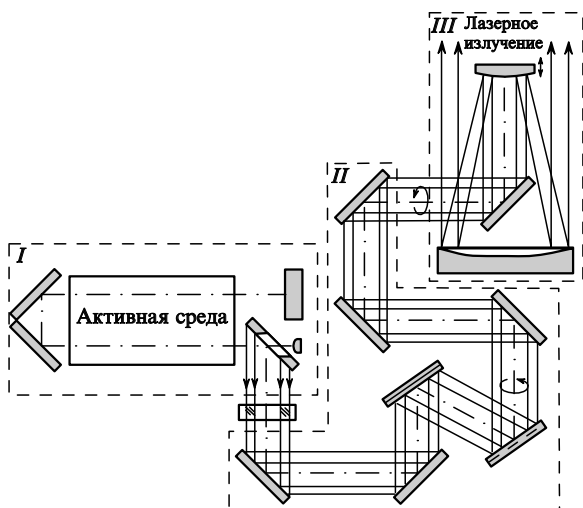


Рис.3. Упрощенная принципиальная оптическая схема лазерной установки на основе DF-НХЛ, обеспечивающей эффективное использование излучения на больших расстояниях: I – НР, заполненный активной средой; II – схема сопряжения для согласования формы и размеров апертур на выходе НР и входе в формирующий телескоп; III – формирующий телескоп для получения пучка излучения с требуемой апертурой и его наведения на объект воздействия.

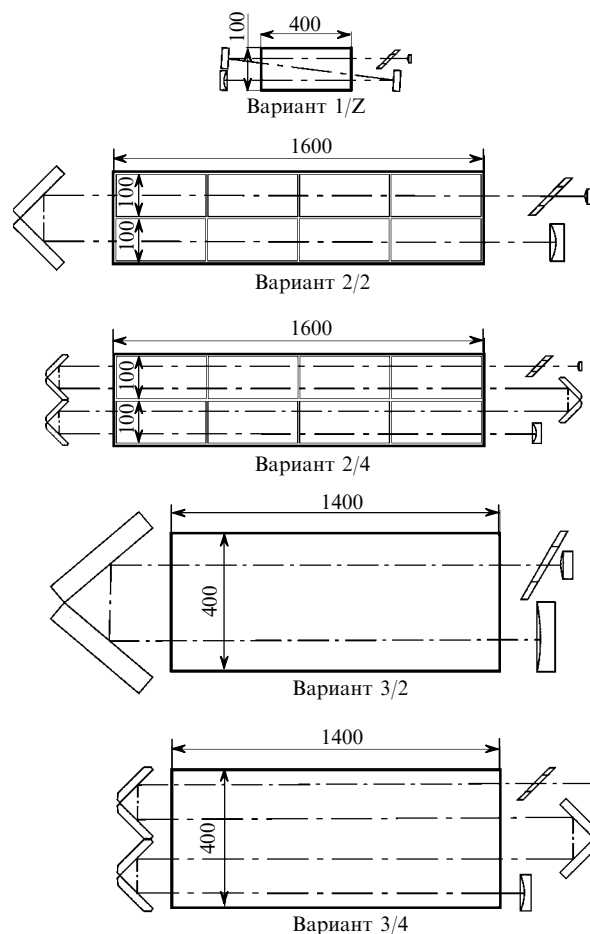


Рис.4. Принципиальные оптические схемы НР для трех рассмотренных вариантов DF-НХЛ с различными размерами среза сопловой решетки в ГАС. (Для того чтобы в схемах 2/4 и 3/4 не возникало паразитных резонаторов между угловыми отражателями, в углы при их вершинах вносятся небольшие расстройки, которые легко рассчитать методами геометрической оптики.) Все размеры на схемах даны в миллиметрах.

первая цифра означает номер варианта DF-НХЛ, вторая – число проходов излучения по активной среде). В расчетах варьировался коэффициент обратной связи резонатора  $r$ . Коэффициенты потерь в каждом зеркале для всех схем резонатора принимались равными 0.4%. Нерезонансными потерями в активной среде пренебрегалось ввиду очень низкого ее давления.

В исследованиях энергетических характеристик излучения непосредственно на выходе лазера объективным критерием при сравнении эффективностей различных схем НР является выходная мощность излучения лазера  $P_0$ , отнесенная к 1 см<sup>2</sup> площади среза сопловой решетки (приведенная мощность излучения  $P_0/S$ ). На рис.5,а представлены зависимости  $P_0/S$  от  $r$ , каждая из которых имеет свой максимум при некотором значении  $r_{\text{max}}$ . Этот максимум обычно и стремятся найти в экспериментах.

В данной работе при выборе оптической схемы НР для лазерной установки на основе DF-НХЛ с использованием формирующей оптической системы будем исходить из двух критериев: достижения максимальной осевой интенсивности сфокусированного лазерного излучения в дальней зоне и ограничения максимальной лучевой нагрузки на зеркалах резонатора предельной величиной, определяемой лучевой прочностью этих зеркал.

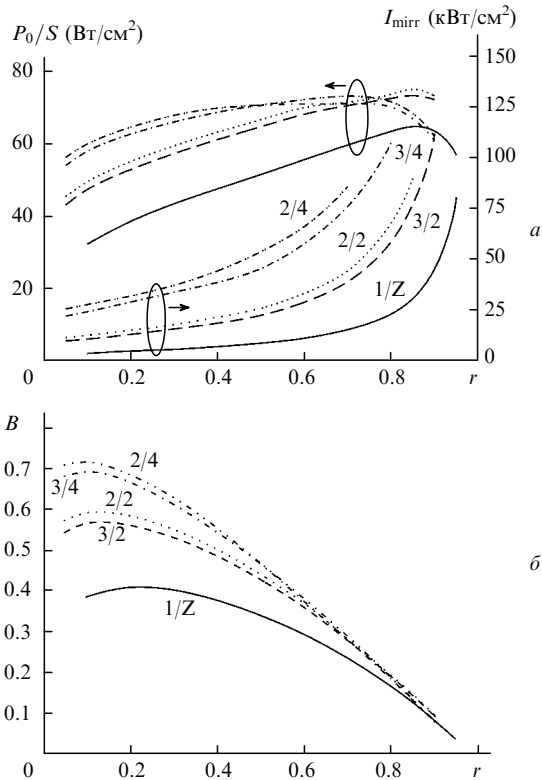


Рис.5. Зависимости приведенной мощности  $P_0/S$ , интенсивности на наиболее нагруженном зеркале  $I_{mirr}$  (а) и относительной осевой интенсивности излучения лазерной установки в дальней зоне  $B$  (б) от коэффициента обратной связи резонатора  $r$  для различных вариантов DF-НХЛ.

Интенсивность излучения в дальней зоне для любого варианта прямо пропорциональна приведенной мощности  $P_0/S$  и обратно пропорциональна квадрату угла расходимости излучения  $\theta$  на выходе формирующего телескопа. Для наиболее часто применяемой кассегреновской схемы формирующего телескопа апертура выходного излучения представляет собой кольцо. В этом случае, несмотря на имеющиеся рекомендации по использованию НР с существенно несимметричным выводом излучения для повышения мощности на выходе резонатора [14], в установке на основе DF-НХЛ мы считаем более целесообразным применение НР с симметричным выводом излучения во избежание потерь мощности излучения при согласовании апертур на выходе резонатора и на входе формирующего телескопа. При линейном увеличении, используемом в приведенной на рис.3 схеме, относительные площади кольцевой апертуры излучения на выходах НР и формирующего телескопа, которые соответствуют коэффициенту выходной связи эквивалентного резонатора Фабри – Перо, равному  $1 - r$ , будут одинаковыми.

Поскольку  $1/\theta^2 \sim 1 - r$ , каждый вариант оптической схемы НР можно характеризовать безразмерным параметром, определяющим относительную яркость лазерного излучения,

$$B(r) = \frac{(1 - r)P_0(r)}{P_{0 \max}^{(2/2)}}$$

где  $P_{0 \max}^{(2/2)}/S$  – максимальная для всех рассмотренных вариантов приведенная мощность (рис.5,а). Используя

этот параметр, можно провести сравнение различных вариантов устройства лазерных установок на основе DF-НХЛ. В принципе, возможно применение конической оптики для изменения относительной площади кольцевой апертуры излучения после его выхода из резонатора. Однако это привело бы к существенному усложнению оптической схемы, появлению дополнительных абберационных искажений и значительному увеличению локальной лучевой нагрузки на конических оптических элементах, поэтому такой случай мы не рассматривали.

Представленные на рис.5,б зависимости  $B(r)$  имеют максимум  $B_{\max}$  при соответствующих значениях  $r_{\text{opt}}$ . Из сравнения с рис.5,а видно, что максимальная осевая интенсивность излучения  $B_{\max}$  в дальней зоне того или иного варианта лазерной установки с НР достигается при коэффициентах выходной связи  $1 - r_{\text{opt}}$ , очень сильно отличающихся от значений  $1 - r_{\max}$ , при которых мощность на выходе резонатора максимальна. Поэтому в лазерной установке с НР и формирующей оптической системой нельзя ориентироваться только на получение максимальной мощности излучения на выходе НР.

Что касается предельной лучевой нагрузки на зеркалах резонатора, то согласно [15] зеркала с многослойным диэлектрическим покрытием могут выдерживать нагрузку до  $60 \text{ кВт/см}^2$ . Приняв для надежно работающих зеркал существенно меньшую предельную нагрузку ( $25 \text{ кВт/см}^2$ ), из зависимостей, приведенных на рис.5,а, можно оценить предельно допустимый коэффициент выходной связи резонатора  $1 - r_{\text{lim}}$ . В табл.1 даны полученные таким образом коэффициенты обратной связи НР:  $r_{\max}$ ,  $r_{\text{opt}}$  и  $r_{\text{lim}}$ . Очевидно, что реальный коэффициент обратной связи  $r_{\text{res}}$  находится из соотношения  $r_{\text{res}} = \min\{r_{\text{opt}}, r_{\text{lim}}\}$ , ему соответствует  $M_{\text{res}} = 1/\sqrt{r_{\text{res}}}$ .

Величина  $P_{\text{res}}$  характеризует полную лазерную мощность на выходе НР с коэффициентом  $M_{\text{res}}$ , приведенным в табл.1. Отношение  $P_{\text{res}}/P_{0 \max}$  определяет потери мощности на выходе такого НР по сравнению с соответствующей максимальной мощностью  $P_{0 \max}$  на выходе резонатора Фабри – Перо. Как следует из табл.1, потери  $1 - P_{\text{res}}/P_{0 \max}$  составляют от 18 до 38 %, однако несмотря на это осевая интенсивность излучения лазерной установки в дальней зоне при  $r = r_{\text{res}}$  в 3–4 раза превышает ее значение в режиме достижения максимальной мощности (при  $r = r_{\max}$ ). Из табл.1 также видно, что получение наибольших  $B_{\max}$  обеспечивают варианты 2/4 и 3/4.

Табл.1. Параметры лазерного излучения DF-НХЛ при использовании различных схем НР.

Вариант	$r_{\max}$	$r_{\text{opt}}$	$r_{\text{lim}}$	$M_{\text{res}}$	$P_{0 \max}/S$ (Вт/см <sup>2</sup> )	$B_{\max}$	$P_{\text{res}}/P_{0 \max}$	$P_{\text{res}}$ (кВт)
1/З	0.86	0.22	0.81	2.1	65	0.41	0.62	16
2/2	0.85	0.13	0.48	2.8	75	0.59	0.69	166
2/4	0.70	0.10	0.05	4.5	73	0.72	0.77	180
3/2	0.85	0.14	0.54	2.7	73	0.57	0.69	282
3/4	0.70	0.105	0.12	3.1	71	0.69	0.82	326

### 5. Выхлопная система

Основными частями выхлопной системы являются сверхзвуковой диффузор, в котором сверхзвуковой поток отработанных газов переводится в дозвуковой с одновременным восстановлением статического давления в нем, и газоструйный эжектор, выполняющий роль паро-

Табл.2. Основные характеристики трех вариантов DF-НХЛ для автономных мобильных лазерных установок с длительностью излучения 50 с.

Характеристики	Варианты ГАС						
	Один среднеразмерный модуль	Восемь среднеразмерных модулей		Крупноразмерный модуль с девятисекционной сопловой решеткой			
Мощность излучения (кВт)	15	160	160	300	300	300	300
Число ступеней эжектора	1	2	2	1	1	2	2
Окислитель для ГЭГ	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Масса резонатора, ГАС, диффузора, эжектора и ГЭГ (т)	0.6	3.6	3.6	3.7	3.7	3.7	3.7
Исполнение баков и арматуры	стандартное	стандартное	специальное	специальное		специальное	
Общая масса СХПК (т)	2.4	13.2	6.4	9.9	12.4	7.6	9.3
Масса компонентов с баками для ГАС (т)	0.5	3.4	1.6	2.3	2.3	2.3	2.3
Масса компонентов с баками для ГЭГ (т)	1.2	6.5	4.5	7.2	9.7	4.9	6.6
Масса арматуры и трубопроводов (т)	0.7	3.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4
Масса несущей рамы* (т)	0.6	3.4	2	2.7	3.2	2.3	2.6
Общая масса лазера (т)	3.6	20.2	12	16.3	19.3	13.6	15.6
Габариты лазера (длина, ширина, высота) (м)	5.8 × 2.0 × 2.5	8.9 × 3.9 × 2.9		8.1 × 3.2 × 3.0		9.3 × 3.2 × 3.0	

\*Принято, что масса несущей рамы составляет 20 % от массы всего установленного на ней оборудования.

струйного насоса для откачки потока с выхода сверхзвукового диффузора в окружающую атмосферу. Минимизация длины сверхзвукового диффузора при сохранении эффективности восстановления статического давления в выхлопном потоке обеспечивается применением многоканальной конструкции проточной части.

Очевидно, что эжектор для мобильной установки должен быть простым по конструкции (т. е. неохлаждаемым) и в нем необходимо использовать в качестве компонентов топлива для ГЭГ доступные недорогие нетоксичные компоненты, удобные в эксплуатации и обеспечивающие приемлемые массогабаритные характеристики системы хранения и подачи компонентов (СХПК). Последнее обстоятельство определяется эффективностью эжектора (отношением расходов эжектируемого и эжектирующего газов), которая тем выше, чем больше давление и температура эжектирующего газа и чем меньше его молярная масса. Максимальная температура эжектирующего газа определяется температурной стойкостью и технологичностью используемых материалов (~ 1100–1200 К), а его начальное давление целесообразно увеличивать свыше 50–60 атм, чтобы избежать нежелательной конденсации паров воды (составляющих основную часть эжектирующего газа), которая будет происходить при более глубоком его охлаждении до необходимого уровня в процессе расширения в сверхзвуковых соплах эжектора. Анализ, проведенный с учетом изложенных выше соображений, показал, что по совокупности эксплуатационных свойств компонентов и массогабаритных характеристик СХПК для обеспечения работы ГЭГ наиболее подходят композиции C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH–O<sub>2</sub>(газообразный)–H<sub>2</sub>O и C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH–H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O.

Для лазеров с мощностью излучения 160 и 300 кВт целесообразно применение связки из восьми двухступенчатых эжекторов. Многоканальность эжекторной системы способствует уменьшению ее длины, а использование двух ступеней – значительному снижению расходов компонентов топлива для ГЭГ. При умеренной мощности лазера (~ 15 кВт) возможно применение более простого одноступенчатого эжектора, поскольку масса установки оказывается небольшой по сравнению с грузоподъемностью транспортных средств (табл.2).

## 6. СХПК и массогабаритные характеристики трех вариантов DF-НХЛ для автономных мобильных лазерных установок

Газообразные компоненты поступают в ГАС и ГЭГ непосредственно из баллонов при начальном давлении до 250 атм, кроме баллонов с NF<sub>3</sub> (90 атм) и C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (до 100 атм) ввиду эксплуатационных особенностей этих компонентов, а жидкие компоненты подаются в ГЭГ путем вытеснения их из баков газообразным азотом. Рассмотрена возможность применения в СХПК помимо стандартных цилиндрических баллонов из легированной стали также и специальных (изготовленных из высокопрочных нержавеющей сталей и титановых сплавов) цилиндрических баллонов, выпускаемых на предприятиях космической промышленности.

Основные параметры и массогабаритные характеристики трех вариантов DF-НХЛ представлены в табл.2. Из нее следует, что во всех вариантах основной вклад в общую массу лазера вносит СХПК, поэтому переход от стандартного исполнения баков, баллонов и арматуры к специальному даст существенный выигрыш. Для восьми-модульного варианта этот выигрыш составляет ~ 40 % (12 т вместо 20 т), поэтому в варианте с мощностью излучения 300 кВт была рассмотрена возможность применения баллонов и арматуры только в специальном исполнении. На примере последнего варианта видно, что для данной мощности излучения наилучшие результаты даст применение двухступенчатого эжектора. Выигрыш при использовании газообразного O<sub>2</sub> по сравнению с H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> не столь уж велик (~ 2 т), больший выигрыш будет в варианте с O<sub>2</sub> при переходе от одноступенчатого к двухступенчатому эжектору (~ 4 т).

Общий вид варианта компоновки DF-НХЛ с мощностью излучения ~ 300 кВт показан на рис.6, чтобы продемонстрировать возможность его размещения на транспортных средствах приемлемых габаритов (даже при использовании двухступенчатого эжектора), например на одном автотягаче с грузоподъемностью не более 16 т. В выхлопной системе применен один многоканальный сверхзвуковой диффузор, к которому после переходной камеры подсоединена связка из восьми двухступен-

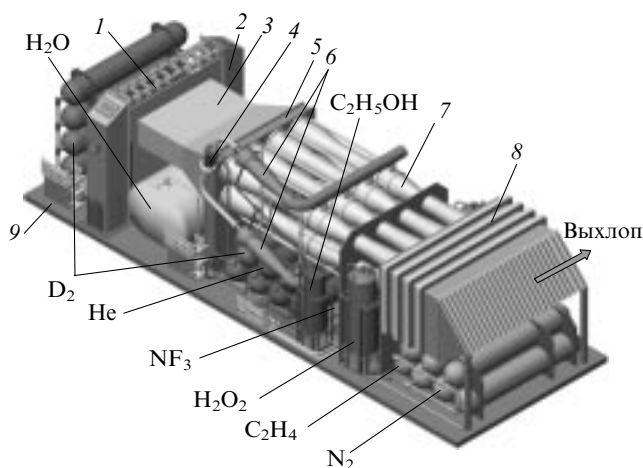


Рис.6. Компонка DF-НХЛ на основе одного крупноразмерного ГАС с девятисекционной сопловой решеткой при использовании  $\text{H}_2\text{O}_2$  в ГЭГ:

1 – крупноразмерный ГАС; 2 – блок зеркал НР; 3 – сверхзвуковой диффузор; 4 – реактор разложения  $\text{H}_2\text{O}_2$ ; 5 – переходная камера; 6 – ГЭГ; 7 – двухступенчатые эжекторы; 8 – устройство шумоглушения; 9 – несущая рама.

чатых эжекторов (два ряда по четыре эжектора в каждом).

## 7. Заключение

Таким образом, рассмотрены различные пути масштабирования составных частей DF-НХЛ для установки, предназначенной для комплексного изучения особенностей прохождения излучения через атмосферу и выработки критериев, обеспечивающих эффективное использование этого излучения на больших (порядка нескольких километров) расстояниях. Оптимизация оптических схем и выбор рациональных термо- и газодинамических параметров, а также принципов компоновки основных систем DF-НХЛ показали, что массогабаритные характеристики этих установок с довольно высокими мощностями излучения ( $\sim 160$  и  $300$  кВт при времени генерации  $50$  с) позволяют размещать их практически на всех возможных транспортных средствах: автотягаче, корабле, самолете и т.п. Вариант DF-НХЛ с мощностью из-

лучения  $\sim 300$  кВт предпочтительнее для применения в перспективной лазерной установке, поскольку он обеспечивает значительно большую мощность по сравнению с многомодульным вариантом ( $\sim 160$  кВт) при практически одинаковых массе и габаритах. Однако при создании демонстрационной лазерной установки в сжатые сроки и с минимально возможными затратами целесообразно использовать многомодульный вариант, поскольку в этом случае основной объем отработки может быть выполнен на одном модуле с мощностью  $P_0 \approx 15$  кВт.

Нужно отметить, что при увеличении вдвое необходимого времени работы в автономном режиме масса лазера будет увеличиваться только примерно на  $50\%$ , а габариты – на  $\sim 20-30\%$ . Значительные резервы в уменьшении массы и габаритов скрыты в использовании ресурсов транспортного средства, на котором размещается лазерная установка (на корабле это вода, керосин вместо спирта, электроэнергия, на самолете – керосин).

Авторы выражают благодарность М.В.Курдюкову и Е.В.Ковалевой за помощь в оформлении статьи.

1. Башкин А.С., Игошин В.И., Никитин А.И., Ораевский А.Н. *Химические лазеры* (М.: ВИНТИ, 1975).
2. Башкин А.С., Игошин В.И., Ораевский А.Н., Щеглов В.А. *Химические лазеры*. Под ред. Н.Г.Басова (М.: Наука, 1982).
3. Basov N.G., Bashkin A.S., Igoshin V.I., Oraevsky A.N., Shcheglov V.A. *Chemical Lasers* (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1990).
4. Klass P.J. *Aviation Week and Space Technology*, **103**, № 7, 34 (1975).
5. Gebhardt F.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2502**, 101 (1995).
6. Башкин А.С., Безноздrev В.Н., Пирогов Н.А. *Труды научно-техн. конф. НПО Энергомаш* (Химки, Моск. обл., 2001, с.15).
7. Albertine J.R. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1871**, 229 (1993).
8. Smith B.A., Wall R. *Aviation Week and Space Technology*, **152**, № 24, 33 (2000).
9. Александров Б.П., Степанов А.А., Щеглов В.А. *Квантовая электроника*, **24**, 163 (1997).
10. Александров Б.П., Второва Н.Е., Исаева Л.Д., Щеглов В.А. *Квантовая электроника*, **21**, 409 (1994).
11. Башкин А.С., Коротков П.И., Максимов Ю.П. и др. *Квантовая электроника*, **24**, 786 (1997).
12. Zelazny S.W., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **293**, 126 (1981).
13. Stepanov A.A., Troshchenkov S.V., Shcheglov V.A. *Laser Phys.*, **6**, 404 (1996).
14. Вирник Я.З., Крутова В.Г., Машенко А.И. и др. *Квантовая электроника*, **4**, 2234 (1977).
15. Wilson L.E. *J. de Physique, Colloque C9*, **41** (11), C9-1 (1980).