

Оптимизация характеристик химического HF-лазера, работающего с использованием нового способа получения окислительного газа

В.К.Ребонэ, И.А.Федоров, Ю.П.Максимов, В.А.Митряев,
М.А.Ротинян, Н.Е.Третьяков, А.Л.Эцина

Оптимизированы энергетические характеристики HF-лазера, работающего с использованием нового способа получения окислительного газа, основанного на принципе двухзонного смешения. В процессе экспериментального исследования варьировалось суммарное количество инертного разбавителя (гелия), подаваемого в лазер, за счет изменения его относительной доли только во второй зоне смешения. При оптимальной относительной доле разбавителя во второй зоне смешения и при соответствующем ей оптимальном положении оптической оси резонатора в режиме постоянного давления в газогенераторе мощность излучения лазера удалось увеличить на 50 %, а удельный энергозъем – на 60 % по сравнению с режимом его работы, реализованным в наших предыдущих исследованиях. При этом количество инертного разбавителя уменьшилось на 35 %, а длина зоны генерации возросла на 20 %.

Ключевые слова: химический лазер, окислительный газ, двухзонное смешение, активная среда.

1. Введение

В работе [1] нами была предложена оригинальная конструкция сверхзвукового непрерывного химического HF-лазера автономного типа с модифицированным сопловым блоком радиального расширения, в котором используется схема смешения реагентов сопло – инжектор – инжектор (далее лазер типа А). Модификация соплового блока заключалась в его оснащении специальным инжектором для впрыскивания холодного инертного разбавителя на входе в сопла. Это позволяет реализовать отдельную подачу атомарного фтора и инертного разбавителя в сопла, а также обеспечить двухзонное смешение реагентов и последующее низкотемпературное течение окислительного газа в сверхзвуковых частях сопел. Предложенное в [1] техническое решение было квалифицировано как новый способ получения окислительного газа [2].

В ходе экспериментального исследования HF-лазера типа А, выполненного в [1], была подтверждена его работоспособность и определены выходные характеристики излучения при перераспределении различных количеств гелия из первой зоны смешения (камеры сгорания газогенератора со степенью первичного разбавления ψ_1) во вторую (примыкающую к соплам) зону смешения (со степенью вторичного разбавления ψ_2). Суммарная степень разбавления топливной смеси ψ_Σ сохранялась неизменной: $\psi_\Sigma = \psi_1 + \psi_2 = \text{const}$. При проведении этих исследований предполагалось, что либо массовый расход

атомарного фтора m_F , либо давление в камере сгорания газогенератора p_c поддерживались постоянными. Расстояние от оптической оси резонатора до среза соплового блока x_c также оставалось фиксированным. Было показано, что при практически полной переброске гелия из первой зоны смешения во вторую (что соответствует $\psi_1 \sim 0.7$ и $\psi_2 \sim 13.5$) при $p_c = \text{const}$ мощность лазерного излучения возрастает на 70 %, а при $m_F = \text{const}$ – на 14 % при одновременном повышении удельного энергозъема на 40 %. Поскольку положение оптической оси резонатора оставалось фиксированным, то не удалось получить никакой информации относительно изменения длины зоны генерации.

Выбранная степень вторичного разбавления ($\psi_2 = 13.5$) очень близка к ее оптимальному с точки зрения достижения максимальной абсолютной мощности излучения значению для режима работы (при $\psi_\Sigma = \psi_1 + \psi_2 = 0.7 + 13.5 = 14.2$) исходной (базовой) модели HF-лазера (далее лазер типа В) [3], сопловой блок которой и подвергся модификации. Однако это еще не означает, что такая же степень разбавления должна быть оптимальной и для лазера типа А. Если это так, то и оптимальное положение оптической оси резонатора, и длина зоны генерации при различных степенях вторичного разбавления могут оказаться различными. Кроме того, интересно оценить влияние суммарного массового расхода реагентов как на абсолютную мощность лазерного излучения N , так и на удельный энергозъем N_Σ .

В соответствии с изложенными выше соображениями цель настоящей работы, которая является продолжением работы [1], состояла в оптимизации энергетических характеристик HF-лазера типа А при изменении относительной доли вторичного инертного разбавителя, подаваемого во вторую зону смешения, положения оптической оси резонатора относительно среза соплового блока и суммарного массового расхода реагентов.

В.К.Ребонэ, И.А.Федоров, Ю.П.Максимов, В.А.Митряев, М.А.Ротинян, Н.Е.Третьяков, А.Л.Эцина. ФГУП «Российский научный центр "Прикладная химия"», Россия, 197198 С.-Петербург, просп. Добролюбова, 14; e-mail: pulya@mail.ru, etsina@online.ru

Поступила в редакцию 23 мая 2006 г.

2. Экспериментальная установка и методика исследования

Экспериментальное исследование проводилось на стендовой установке, включавшей в себя HF-лазер типа А, системы подачи рабочих реагентов (F_2 , D_2 , H_2 , He) и регистрации режимных параметров, систему выхлопа отработанных продуктов реакции, а также оптическую измерительную схему. Поскольку все элементы установки подробно описаны в работе [1], то здесь ограничимся рассмотрением только особенностей исследуемой модели лазера.

Конструкция модифицированного соплового блока HF-лазера типа А показана на рис.1. Сопловой блок 2 со щелевыми соплами 3 состоит из двух симметричных половин (верхней и нижней), стянутых шпильками 7. Между камерой сгорания газогенератора 1 и входной частью щелевых сопел 3 соплового блока 2 размещен специальный инжектор 4 в виде перфорированной отверстиями диаметром 0.5 мм трубки из нержавеющей стали диаметром 6 мм, предназначенной для впрыскивания в каждое щелевое сопло 3 шириной 3 мм вторичного инертного разбавителя (атомы He*). Отверстия размещены в три ряда (расстояние между рядами 1.3 мм) с шагом (в каждом ряду) 5 мм, соответствующим шагу сопел (инжектор содержит 108 отверстий). Угол между осями двух смежных отверстий равен 25° . Расстояние от плоскости выходных сечений отверстий центрального ряда до плоскости критических сечений сопел составляет 4.5 мм. Вторичное горючее (молекулы H_2) подается через накладной коллектор, образованный 37 трубками-инжекторами 5 (на рис.1 показаны только две крайние трубки) с наружным диаметром 2 мм, которые перфорированы отверстиями диаметром 0.35 мм (каждая трубка содержит 20 отверстий). Отверстия размещены в шахматном порядке с шагом 4 мм в каждом ряду. Трубки-инжекторы закреплены на кромках сопел 3; оси отверстий составляют угол 20° с направлением потока окислительного газа (смеси F–He–DF–He*), истекающего из щелевых сопел. Наличие

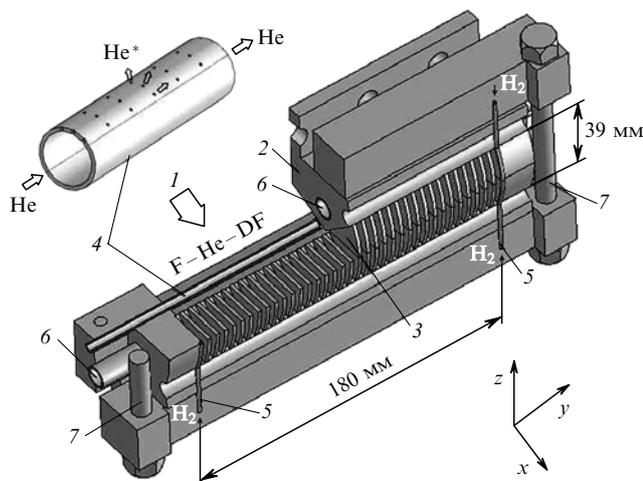


Рис.1. Конструкция модифицированного соплового блока HF-лазера типа А:

1 – поток продуктов из камеры сгорания газогенератора; 2 – сопловой блок; 3 – щелевое сверхзвуковое сопло; 4 – специальный инжектор для впрыскивания вторичного инертного разбавителя (гелий); 5 – трубка-инжектор для подачи вторичного горючего (водород); 6 – канал охладителя (вода); 7 – шпилька-стяжка.

сопла 3 и двух инжекторов (4 и 5) собственно и дало реализованной схеме смешения реагентов название «сопло – инжектор – инжектор». Размер выходного сечения соплового блока составляет 180×39 мм. Сопловой блок охлаждается водой, которая поступает через каналы 6.

В экспериментах применялся устойчивый двухзеркальный сферический резонатор закрытого типа с выводом лазерного излучения через отверстие диаметром 2 мм, выполненное в одном из зеркал. Его параметры приведены в [1].

В качестве рабочих реагентов использовались газообразные фтор (окислитель F_2), дейтерий (первичное горючее D_2), гелий (первичный He) и вторичный (He*) разбавитель и водород (вторичное горючее H_2) в молярном соотношении $D_2:F_2:He:H_2:He^* = 1:\alpha:\psi_1(\alpha-1):\alpha_2 \times (\alpha-1):\psi_2(\alpha-1)$, где $\alpha = n_{F_2}/n_{D_2}$; $\psi_1 = n_{He}/n_{F_2}^{free}$; $\alpha_2 = n_{H_2}/n_{F_2}^{free}$; $\psi_2 = n_{He^*}/n_{F_2}^{free}$; $n_{F_2}^{free} = n_{F_2} - n_{D_2}$; n_i – число молей соответствующего реагента.

Согласно методике исследований предполагалось проведение трех серий испытаний. Цель первых двух серий заключалась в получении зависимостей характеристик HF-лазера от степени вторичного разбавления ψ_2 , суммарного массового расхода реагентов m_Σ и положения оптической оси резонатора относительно среза соплового блока x_c . Как отмечалось во Введении, при проведении предыдущего исследования [1] суммарная степень разбавления топливной смеси сохранялась неизменной и близкой к оптимальной для HF-лазера исходной конструкции типа В [3]: $\psi_\Sigma = \psi_1 + \psi_2 = 13.5$, а максимальная мощность лазерного излучения была достигнута при практически полной переброске гелия из первой зоны смешения во вторую, т. е. при $\psi_1 \sim 0.7$ и $\psi_2 \sim 13.5$, и положении оптической оси резонатора $x_c = 17.5$ мм, которое оставалось фиксированным. Однако этот факт еще не означает, что степень вторичного разбавления $\psi_2 \sim 13.5$ является оптимальной и для лазера типа А. Возможно, она должна быть больше, а возможно, и меньше, что не может не отразиться на положении оптической оси резонатора. Для ответа на этот вопрос в первых двух сериях эксперименты проводились в двух режимах, в каждом из которых положение оптической оси резонатора относительно среза соплового блока оставалось фиксированным (при изменении x_c в каждой серии в диапазоне 13–32 мм), а степень вторичного разбавления ψ_2 принимала значения 10, 15 и 21. Такой подход позволяет, с одной стороны, повысить достоверность полученных результатов, поскольку в каждой серии испытаний сопоставляются два режима. Один из них принят за номинальный – это режим, в котором $\psi_2^{nom} \sim 15$ (близкий к режиму, в котором $\psi_2 \sim 13.5$). А с другой стороны, появляется возможность получить зависимости $N = f(\psi_2, x_c)$ и $N_\Sigma = f(\psi_2, x_c)$ при минимальном числе испытаний.

Безразмерные коэффициенты, характеризующие химический состав среды в камере сгорания газогенератора, поддерживались постоянными ($\alpha \sim 2.5$ и $\psi_1 \sim 0.7$), исходя из условия $m_F = const \sim 9$ г/с. По мере роста степени вторичного разбавления ψ_2 от 10 до 21 давление в газогенераторе p_c и суммарный массовый расход реагентов m_Σ изменялись от 1.13 до 1.30 кг/см² и от 30 до 40 г/с соответственно.

Цель третьей серии испытаний состояла в исследовании влияния на характеристики HF-лазера вторичной степени разбавления ψ_2 при условии $p_c = const$. Эта серия включала в себя ряд испытаний, в которых давление

в камере сгорания газогенератора p_c составляло ~ 1.2 кг/см² (что соответствует номинальной степени вторичного разбавления $\psi_2^{\text{ном}} \sim 15$). Испытания проводились при оптимальных положениях оптической оси резонатора x_c^{opt} , найденных из зависимостей $N = f(\psi_2, x_c)$ и $N_\Sigma = f(\psi_2, x_c)$ для коэффициентов $\psi_2 = 10, 15$ и 21 . Коэффициент избытка вторичного горючего α_2 во всех трех сериях испытаний поддерживался постоянным и равным ~ 8 .

3. Результаты экспериментального исследования

3.1. Пространственно-энергетические характеристики лазерного излучения

Результаты первых двух серий испытаний представлены на рис.2 в виде двух групп зависимостей: $N = f(\psi_2, x_c)$ и $N_\Sigma = f(\psi_2, x_c)$. Они построены для трех значений коэффициента вторичного разбавления ψ_2 (минимального, номинального и максимального) в достаточно широком диапазоне положений оптической оси резонатора x_c . Все зависимости демонстрируют монотонный рост энергетических характеристик лазерного излучения по мере удаления оптической оси резонатора от среза соплового блока, но только до известного предела, который определяется оптимальным значением x_c^{opt} , зависящим от коэффициента ψ_2 : $x_c^{\text{opt}} = 21$ мм при $\psi_2^{\text{мин}} \sim 10$, $x_c^{\text{opt}} = 25$ мм при $\psi_2^{\text{ном}} \sim 15$ и $x_c^{\text{opt}} = 26$ мм при $\psi_2^{\text{макс}} \sim 21$ (рис.3,а).

По данным рис.2,а построена зависимость $N^{\text{max}} = f(\psi_2)$ (рис.3,б) максимальных значений лазерной мощности (им отвечают оптимальные положения x_c^{opt} на рис.3,а) от коэффициента вторичного разбавления ψ_2 . Видно, что в исследуемой области изменения коэффициента ψ_2 ($10 \leq \psi_2 \leq 21$) функция $N^{\text{max}} = f(\psi_2)$ не имеет максимума. В целом наблюдается слабое изменение мощности лазерного излучения при изменении коэффициента вторичного разбавления. Плавный характер зави-

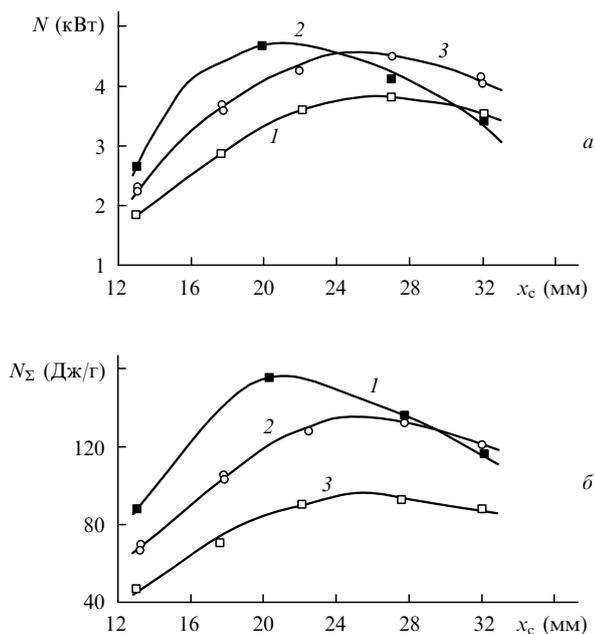


Рис.2. Зависимости мощности лазерного излучения (а) и удельного энергосъема (б) от положения оптической оси резонатора относительно среза соплового блока при $\psi_2 \sim 10$, $p_c \sim 1.13$ кг/см² (1), $\psi_2 \sim 15$, $p_c \sim 1.21$ кг/см² (2) и $\psi_2 \sim 21$, $p_c \sim 1.30$ кг/см² (3).

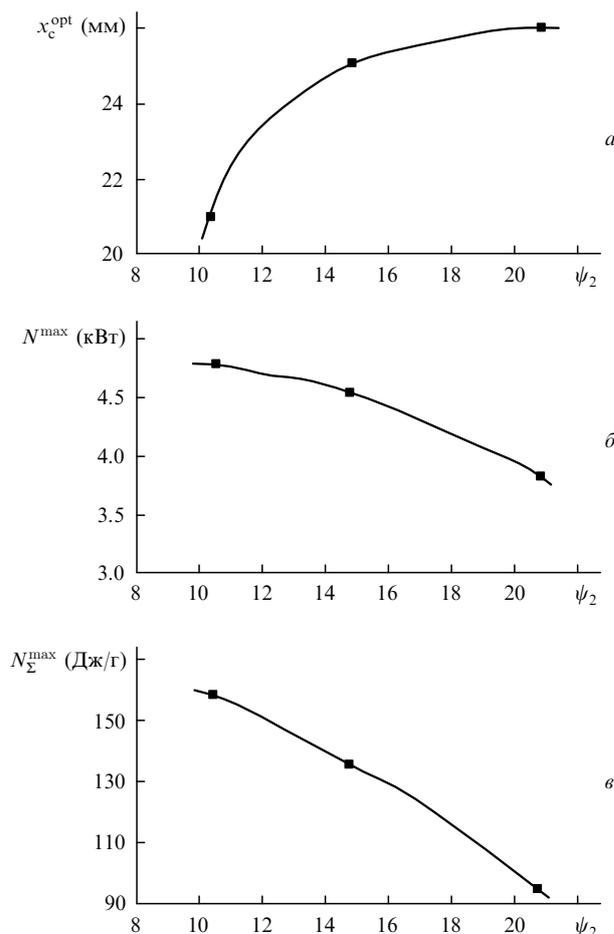


Рис.3. Зависимости оптимального положения оптической оси резонатора относительно среза соплового блока (а), максимальных мощности лазерного излучения (б) и удельного энергосъема (в) от коэффициента вторичного разбавления.

симости $N^{\text{max}} = f(\psi_2)$, особенно в области малых значений коэффициента ψ_2 , позволяет определить вероятное положение ее максимума, который должен лежать в диапазоне $\psi_2^{\text{opt}} = 9 - 10$.

Что касается максимального удельного энергосъема N_Σ^{max} , то из рис.3,в видно, что его зависимость от коэффициента ψ_2 имеет более резко выраженный характер, который является следствием влияния суммарного массового расхода реагентов (с ростом коэффициента ψ_2 расход растет быстрее, чем лазерная мощность).

В третьей серии испытаний предполагалось получить зависимости $N^{\text{max}} = f(\psi_2)$ и $N_\Sigma^{\text{max}} = f(\psi_2)$ при постоянном давлении в камере сгорания газогенератора $p_c \sim 1.2$ кг/см². Значения N^{max} и N_Σ^{max} при номинальных степени вторичного разбавления $\psi_2^{\text{ном}} \sim 15$ и давлении $p_c^{\text{ном}} \sim 1.2$ кг/см² непосредственно получены из рис.2 (кривые 2). При максимальной степени вторичного разбавления $\psi_2^{\text{макс}} \sim 21$ значения N^{max} и N_Σ^{max} отвечают давлению $p_c^{\text{макс}} \sim 1.3$ кг/см² (рис.2, кривые 3), поэтому они были пересчитаны для номинального давления по формулам

$$N(p_c^{\text{ном}}) = N(p_c^{\text{макс}}) \frac{p_c^{\text{ном}} N_\Sigma(p_c^{\text{ном}})}{p_c^{\text{макс}} N_\Sigma(p_c^{\text{макс}})}, \quad (1)$$

$$N_\Sigma(p_c^{\text{ном}}) = N_\Sigma(p_c^{\text{макс}}) \frac{1 - 0.51(p_c^{\text{ном}} - 1.3)}{1 - 0.51(p_c^{\text{макс}} - 1.3)}, \quad (2)$$

Табл.1. Результаты испытаний HF-лазера типа А при постоянном давлении в камере сгорания газогенератора $p_c \sim 1.2 \text{ кг/см}^2$.

Режим работы лазера	ψ_2	N^{\max} (кВт)	N_{Σ}^{\max} (Дж/г)	N_F^{\max} (Дж/г)	m_{Σ} (г/с)	x_c (мм)
Оптимальный	10	5.19	161	536	32.2	21
Промежуточный	15	4.56	133	528	34.2	25
Номинальный	15	3.44	100	382	34.2	17.5
Постноминальный	21	3.71	100	445	37.2	26

где p_c^{nom} и p_c^{max} измеряются в кг/см^2 . Значения N^{\max} и N_{Σ}^{\max} при минимальной степени вторичного разбавления $\psi_2^{\text{min}} \sim 10$ и номинальном давлении $p_c^{\text{nom}} \sim 1.2 \text{ кг/см}^2$ получены в настоящем исследовании. Все эти данные приведены в табл.1. Они позволяют более корректно сравнить энергетические характеристики HF-лазера типа А, работающего при постоянном давлении в камере сгорания газогенератора $p_c^{\text{nom}} \sim 1.2 \text{ кг/см}^2$ и фиксированной степени первичного разбавления топливной смеси гелием в ней $\psi_1 \sim 0.7$, при изменении степени вторичного разбавления в диапазоне $10 \leq \psi_2 \leq 21$.

Анализ полученной экспериментальной информации приводит к следующим выводам. Вариации коэффициента вторичного разбавления активной среды гелием в диапазоне $10 \leq \psi_2 \leq 21$ оказывают существенное влияние на энергетические характеристики лазерного излучения. С уменьшением коэффициента ψ_2 и лазерная мощность N , и удельный энергосъем N_{Σ} возрастают, а длина зоны генерации Δx_L (связанная с оптимальным положением оптической оси резонатора условием $\Delta x_L \geq 2x_c^{\text{opt}}$) снижается. С увеличением коэффициента ψ_2 параметры N и N_{Σ} уменьшаются, но при этом значительно удлиняется зона генерации. Следовательно, с одной стороны, сопловой блок модифицированной конструкции позволяет за счет вторичного разбавления активной среды гелием управлять длиной зоны генерации (в предыдущей работе [1] нам не удалось наглядно продемонстрировать это). С другой стороны, выбор оптимальной степени вторичного разбавления следует проводить на основе компромисса между энергетическими характеристиками лазерного излучения и пространственными характеристиками активной среды.

Оптимизация характеристик HF-лазера типа А по отношению к номинальному режиму его работы ($\psi_2 \sim 15$ и $x_c = 17.5 \text{ мм}$), реализованному в [1], дала следующие результаты. При коэффициенте ψ_2 , близком к оптимальному ($\psi_2^{\text{opt}} \sim 10$), и при соответствующем ему оптимальном положении оптической оси резонатора $x_c^{\text{opt}} = 21 \text{ мм}$ ($\Delta x_L = 42 \text{ мм}$) в условиях $p_c = \text{const} \sim 1.2 \text{ кг/см}^2$ мощность лазерного излучения N удалось увеличить в 1.5 раза (с 3.44 до 5.19 кВт), удельный энергосъем N_{Σ} – в 1.6 раза (со 100 до 161 Дж/г) и удельную мощность в расчете на единицу расхода свободного фтора N_F – в 1.4 раза (с 382 до 536 Дж/г) (табл.1).

Проведем оценку интегрального эффекта, который имеет место вследствие переброски 95 % гелия из первой зоны смешения во вторую и оптимизации его суммарного количества. Для этого сопоставим энергетические характеристики базовой (исходной) модели лазера (лазер типа В), сопловой блок которой подвергался модификации, и модифицированной модели (лазер типа А).

Эффект переброски гелия из первой зоны смешения во вторую при сохранении его суммарного количества ($\psi_{\Sigma} \sim 13.5$), который был исследован нами в работе [1],

привел к росту лазерной мощности в 1.7 раза. Оптимизация суммарного количества гелия, выполненная в настоящей работе, выразилась в его снижении на 35 % (при уменьшении ψ_2 от 13.5 до ~ 10). Она привела к дальнейшему росту лазерной мощности N еще в 1.5 раза, удельного энергосъема N_{Σ} в 1.6 раза и удельной мощности N_F в 1.4 раза. Полученная величина $N_F = 875 \text{ Дж/г}$ сопоставима с величиной $N_F = 870 \text{ Дж/г}$, достигнутой при испытании базовой модели лазера. Этот факт является следствием больших ($\sim 40\% - 50\%$) потерь атомарного фтора как за счет высоких тепловых потерь исследуемой маломасштабной модели, так и за счет длительного времени пребывания продуктов сгорания в камере газогенератора и неоптимальной конструкции специального инжектора для впрыскивания вторичного инертного разбавителя во вторую зону смешения.

Таким образом, интегральный эффект с точки зрения энергетики лазера при переходе от базовой модели лазера к модифицированной оценивается нами как увеличение лазерной мощности N в $1.7 \times 1.5 = 2.55$ раза и удельного энергосъема N_{Σ} в 1.6 раза. При этом длина зоны генерации Δx_L возросла в 1.6 раза (с 26 до 42 мм).

3.2. Анализ полученных результатов

За счет чего же возникает столь значительный интегральный эффект? Для ответа на этот вопрос проведем сравнительный анализ работы лазера типа А в контрольном режиме и лазера типа В в базовом режиме. В базовом режиме (лазер типа В) весь инертный разбавитель через форсуночную головку поступает в камеру сгорания газогенератора (в первую зону смешения). В контрольном режиме (лазер типа А) в первую зону смешения поступает $\sim 5\%$ инертного разбавителя ($\psi_1 \sim 0.7$), а $\sim 95\%$ ($\psi_2 = 13.5$) подается через специальный инжектор во входные сечения окислительных сопел (во вторую зону смешения). При этом обоим режимам отвечают следующие условия: температура в первой зоне смешения T_c составляет $\sim 2400 \text{ К}$; давление в камере сгорания газогенератора p_c поддерживается равным $\sim 1.36 \text{ кг/см}^2$; суммарная степень разбавления топливной смеси изменяется в узком диапазоне ($\psi_{\Sigma} = \psi_1 + \psi_2 = 12.4 - 14.2$).

В базовом режиме работы результаты получены при оптимальном положении оптической оси резонатора $x_c^{\text{opt}} = 13 \text{ мм}$, а в контрольном режиме – при $x_c = 17.5 \text{ мм}$, которое отличается от оптимального ($x_c^{\text{opt}} = 25 \text{ мм}$). Для приведения результатов к оптимальным условиям можно использовать корректирующий коэффициент $k = N^{\text{nom}}(x = 25 \text{ мм})/N^{\text{nom}}(x = 17.5 \text{ мм}) = 1.33$, на который следует умножить энергетические характеристики контрольного режима. Энергетические характеристики скорректированного таким образом контрольного режима приведены в табл.2. Они превышают таковые для базового режима по лазерной мощности в $N^A/N^B = 7.51 \text{ кВт}/3.48 \text{ кВт} = 2.16$ раза и по удельному энергосъему в $N_{\Sigma}^A/N_{\Sigma}^B = (226 \text{ Дж/г})/(173 \text{ Дж/г}) = 1.31$ раза. Удельная мощность, приходящаяся на единицу расхода свободного фтора, оказалась в $N_F^A/N_F^B = (831 \text{ Дж/г})/(870 \text{ Дж/г}) = 0.955$ раза ниже.

Характерная особенность сравниваемых режимов работы лазера заключается в том, что отношение массовых расходов свободного фтора $m_F^A/m_F^B = (9 \text{ г/с})/(4 \text{ г/с}) = 2.25$ весьма близко к отношению лазерных мощностей $N^A/N^B = 2.16$. Если принять во внимание то, что каждый атом фтора в лазере типа А «реализует» энергию, соста-

Табл.2. Сравнительные данные по энергетическим характеристикам HF-лазера.

Режим работы лазера	α	ψ_1	ψ_2	m_c (г/с)	m_Σ (г/с)	p_c (кг/см ²)	x_c (мм)	N (кВт)	N_Σ (Дж/г)	N_F (Дж/г)
Скорректированный контрольный режим (лазер типа А)	2.45	0.67	13.5	29.4	33.2	1.36	17.5	7.51	226	831
Базовый режим (лазер типа В)	1.52	12.4	0	18.0	20.1	1.36	13	3.48	173	870

Примечание: m_c – расход газогенераторного топлива.

вляющую 0.955 от энергии, выделяющейся в лазере типа В, то реальное увеличение мощности излучения в лазере типа А равно отношению массовых расходов свободного фтора с учетом коэффициента 0.955, т. е. $0.955(m_F^A/m_F^B) = 0.955 \times 2.25 = 2.15$. А это отношение почти в точности совпадает с отношением лазерных мощностей $N^A/N^B = 2.16$. Отношение удельных энергоъемов в скорректированном режиме совпадает с их отношением $N_\Sigma^A/N_\Sigma^B = (N^A/N^B)(m_\Sigma^B/m_\Sigma^A) = 2.16 [(20.1 \text{ г/с})/(33.2 \text{ г/с})] = 1.31$ в базовом режиме.

Отсюда следует вывод – рост мощности излучения, генерируемого лазером типа А, полностью отслеживает рост количества свободного фтора, поступающего в зону формирования активной среды, при условии равенства давлений в газогенераторах лазеров обоих типов.

При практически полной (~95 %) переброске гелия во вторую зону смешения в области входных сечений окислительных сопел происходит смешение струй холодного (при $T_{He} \sim 290 \text{ К}$) гелия с горячим (при $T_c \sim 2400 \text{ К}$) потоком равновесных продуктов сгорания из газогенератора. Результаты оценочного расчета параметров полностью перемешанной смеси, выполненного для условий контрольного режима в приближении теоретической модели мгновенного смешения, показали, что температура полностью перемешанной смеси в контрольном режиме ($\psi_2 = 13.5$, лазер типа А) снижается до $T_{mix}^A \sim 870 \text{ К}$ (в 2.8 раза) по сравнению с температурой в базовом режиме $T_{mix}^B = T_c \approx 2400 \text{ К}$ (лазер типа В).

Снижение температуры вызовет снижение давления пропорционально отношению $(T_{mix}^A)^{1/2}/(T_{mix}^B)^{1/2} = (870 \text{ К})^{1/2}/(2400 \text{ К})^{1/2} = 0.6$. В отсутствие необходимости нагрева инертного разбавителя до температуры $T_c \sim 2400 \text{ К}$ уменьшится количество исходных реагентов (F_2, D_2), сжигание которых обеспечивает такой нагрев. При сохранении неизменным количества нарабатываемого свободного фтора (в базовом режиме $m_F = 4 \text{ г/с}$) это, в свою очередь, приведет к снижению количества равновесных продуктов сгорания в газогенераторе и, следовательно, к падению давления в нем. В базовом режиме работы лазера (лазер типа В) для наработки одного грамма атомарного фтора необходимо затратить $m_c/m_F = (18 \text{ г/с})/(4 \text{ г/с}) = 4.5$ относительных единиц газогенераторного топлива, а в контрольном режиме (лазер типа А) – только $(29.4 \text{ г/с})/(9 \text{ г/с}) = 3.27$. Следовательно, при переходе от базового режима к контрольному расход газогенераторного топлива m_c снизится в $3.27/4.5 = 0.726$ раза. Давление в камере сгорания отследит и это снижение. В результате совместного снижения температуры в камере сгорания и количества исходных реагентов давление в ней упадет в $(0.6 \times 0.726)^{-1} = 2.3$ раза.

Определение, а тем более сопоставление энергетических характеристик непрерывного химического HF-лазера принято проводить при некотором заданном давлении в активной среде, а значит, и в газогенераторе. При таком подходе очевидно, что давление в газогенераторе

p_c для контрольного режима необходимо поднять до значения $\sim 1.36 \text{ кг/см}^2$, характерного для базового режима. Это можно сделать путем увеличения массового расхода реагентов в 2.3 раза. В такой же пропорции возрастет и количество свободного фтора, поступающего в активную среду. Данный факт подтвержден нами экспериментально при сопоставлении характеристик лазеров, работающих в базовом и контрольном режимах: $m_F^A/m_F^B = 2.25$.

Снижение в 2.8 раза температуры газа на входе в окислительные сопла в контрольном режиме приведет к соответствующему снижению поступательной температуры в активной среде. В работе [4] показано, что удельная мощность в расчете на единицу расхода свободного фтора N_F обратно пропорциональна этой температуре. Следовательно, энергетические характеристики лазера возрастут. По данным нашего предыдущего исследования [1] они увеличились на $\sim 70 \%$.

Тогда ожидаемый расчетный интегральный эффект, обусловленный влиянием на энергетические характеристики HF-лазера снижения температуры в камере сгорания газогенератора и количества исходных реагентов, а также снижения поступательной температуры активной среды, при переходе от базовой модели (лазер типа В) к модифицированной (лазер типа А) выразится в увеличении мощности в $N^A/N^B = 2.3 \times 1.7 = 3.9$ раза. Естественно, что расчетный эффект отличается от полученного непосредственно в эксперименте ($N^A/N^B = 2.16$) по причинам, отмеченным выше.

Таким образом, сравнительный анализ работы лазера типа А в контрольном режиме и лазера типа В в базовом режиме позволил выявить физические причины роста энергетических характеристик лазера типа А, в котором используется предложенный нами новый способ получения окислительного газа. Эти причины заключаются, во-первых, в увеличении количества свободного фтора, подаваемого в зону формирования активной среды (при условии равенства давлений в газогенераторах лазеров обоих типов), и, во-вторых, в снижении поступательной температуры активной среды.

4. Заключение

Экспериментальное исследование по оптимизации энергетических характеристик HF-лазера автономного типа показало следующее. Вариации коэффициента вторичного разбавления ψ_2 в исследованном диапазоне ($10 \leq \psi_2 \leq 21$) приводят к существенному изменению пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения. С уменьшением коэффициента ψ_2 и лазерная мощность, и удельный энергоъем возрастают, а длина зоны генерации снижается. С увеличением коэффициента ψ_2 энергетические характеристики уменьшаются, но при этом значительно удлиняется зона генерации (вплоть до $\Delta x_L = 52 \text{ мм}$). При коэффициенте ψ_2 , близком к оптимальному ($\psi_2^{opt} \sim 10$), и при соответст-

вующем ему оптимальном положении оптической оси резонатора $x_c^{\text{opt}} = 21$ мм в условиях $p_c = \text{const} \sim 1.2$ кг/см² мощность излучения лазера типа А удалось увеличить на 50 %, а удельный энергосъем – на 60 % по сравнению с их значениями в номинальном режиме его работы ($\psi_2^{\text{nom}} \sim 15$ и $x_c^{\text{nom}} = 17.5$ мм), реализованном в нашем предыдущем исследовании [1]. При этом суммарное количество инертного разбавителя уменьшилось на 35 %, а длина зоны генерации возросла на 20 %.

Сопоставление энергетических характеристик базовой (исходной) модели лазера (лазер типа В), сопловой блок которой подвергнулся модификации, и модифицированной модели (лазер типа А) показало, что интегральный эффект, который имеет место вследствие переброски 95 % гелия из первой зоны смещения во вторую и опти-

мизации его суммарного количества, выразился в увеличении лазерной мощности, генерируемой лазером типа А, в 2.55 раза, удельного энергосъема в 1.6 раза и длины зоны генерации в 1.6 раза. Выявлены физические причины, приводящие к такому интегральному эффекту.

1. Ребонэ В.К., Федоров И.А., Максимов Ю.П., Ротинян М.А., Третьяков Н.Е., Эцина А.Л. 3. *Квантовая электроника*, **34**, 795 (2004).
2. Ребонэ В.К., Федоров И.А., Конкин С.В., Ротинян М.А. Патент РФ 2256268, МКИ H01S 3/22. Приоритет от 30.09.03.
3. Конкин С.В., Ребонэ В.К., Ротинян М.А., Федоров И.А. *Квантовая электроника*, **23**, 409 (1996).
4. Ребонэ В.К., Ротинян М.А., Федоров И.А. *Квантовая электроника*, **23**, 707 (1996).