

Влияние способа подачи вторичного горючего на характеристики непрерывного химического HF-лазера с трехструйным сопловым блоком

И.А.Федоров, С.В.Конкин, В.К.Ребонэ, М.А.Ротинян, Н.Е.Третьяков

Экспериментально исследовано влияние угла инжекции вторичного горючего в поток окислительного газа и давления активной среды на энергетические и пространственные характеристики непрерывного химического HF-лазера с трехструйным сопловым блоком. Показано, что интенсификация смешения реагентов на выходе соплового блока, выполненного по схеме сопло – сопло – инжектор, за счет инжекции вторичного горючего под углом 20° к направлению потока окислительного газа позволяет достигнуть максимума удельного энергосъема при массовом расходе водорода, на 20 % меньшем, чем при параллельной инжекции. При этом удельный энергосъем возрастает на 12 %, а протяженность зоны генерации снижается на 15 %. Удельный энергосъем, составляющий 50 % от максимального, может быть достигнут при статическом давлении активной среды ~ 13 Тор, что позволяет при эвакуации отработанных продуктов реакции в окружающее пространство вдвое поднять давление на выходе из диффузора.

Ключевые слова: химический лазер, сопловой блок, выходные характеристики.

1. Введение

Выполненный нами в работах [1–3] комплекс исследований по поиску путей и способов увеличения протяженности зоны генерации сверхзвуковых непрерывных химических HF-лазеров (HF-НХЛ) показал, что наиболее перспективным в этом отношении представляется использование сопловых блоков (СБ) с трехструйной схемой смешения реагентов, согласно которой в полость резонатора между струями окислительного газа (содержащего атомы фтора) и вторичного горючего (молекулами водорода) подается струя разделительного инертного газа (вторичного либо дополнительного разбавителя – гелия). Детально исследованный экспериментально стендовый образец киловаттного HF-НХЛ с трехструйным СБ, построенным по схеме смешения реагентов сопло – сопло – инжектор, продемонстрировал ключевые преимущества этой схемы смешения: высокий удельный энергосъем ($N_S = 225$ Дж/г) и большую протяженность генерационной зоны ($\Delta x_L = 12.5$ см) [1]. Реализованные энергетические характеристики являются далеко не предельными (расчеты показывают, что удельный энергосъем может достигать 300 Дж/г), поэтому для их повышения необходимы дальнейшие исследования и проработки. В частности, для указанного выше HF-НХЛ с устройством подачи вторичного горючего в виде накладного коллектора наиболее простым способом, который может привести к повышению удельного энергосъема лазера, является интенсификация смешения за счет инжекции струй водорода под углом к направлению потока атомов фтора.

Сильное влияние на удельные энергетические параметры HF-НХЛ оказывает статическое давление p_s в зоне

генерации. Это давление обусловлено необходимостью обеспечения как эффективного перемешивания сверхзвуковых потоков реагентов за времена, сравнимые с характерным временем релаксации колебательной энергии, запасенной в активной среде (АС), так и приемлемой протяженности генерационной зоны.

Несмотря на то что скорость реакции накачки $F + H_2 \rightarrow HF(v) + H$ (где $HF(v)$ – возбужденная молекула; v – колебательное квантовое число) весьма велика, из-за высокой скорости релаксации молекул $HF(v)$ давление в АС достаточно мало и, как правило, не превышает 5–7 Тор. Это ограничивает давление на выходе диффузора, через который осуществляется выброс отработанных продуктов реакции в окружающее пространство. Для лазеров наземного базирования данное ограничение является критическим, поскольку предполагает применение специальных устройств (обычно эжекторов), наличие которых значительно увеличивает общий массовый расход газов, необходимый для работы такого лазера, и резко снижает его удельный энергосъем.

Для продвижения в область более высоких рабочих давлений без существенной потери в энергосъеме лазера также следует переходить к интенсифицированному режиму смешения реагентов, который очевидно приведет к уменьшению (по сравнению с параллельной инжекцией водорода [1]) протяженности зоны генерации. Трехструйная схема смешения, на наш взгляд, обладает определенными возможностями в плане повышения статического давления АС, поскольку дополнительный разбавитель снижает ее поступательную температуру, что должно способствовать падению темпа релаксации колебательной энергии.

Настоящая работа посвящена экспериментальной оценке степени влияния способа подачи вторичного горючего как на пространственно-энергетические характеристики HF-НХЛ с трехструйным сопловым блоком, так и на давление в его АС.

2. Экспериментальная установка и система измерений

Исследования проводились на стендовой установке, оснащенной технологическими системами, которые позволяют выполнять многорежимные испытания HF-НХЛ с изменением по заданной программе как массовых расходов любого из реагентов, так и положения оптической оси резонатора относительно среза СБ [4]. В качестве рабочих реагентов использовались газообразные фтор (окислитель), дейтерий (первичное горючее), водород (вторичное горючее) и гелий (первичный (He) и вторичный (He*) разбавители) в молярном соотношении $D_2 : F_2 : He : H_2 : He^* = 1 : \alpha_1 : \psi_1(\alpha_1 - 1) : \alpha_2(\alpha_1 - 1) : \psi_2(\alpha_1 - 1)$.

Трехструйный СБ, прошедший детальную отработку в стендовых условиях, изображен на рис.1,а. Он включает 33 профилированных щелевых сверхзвуковых сопла 1 для подачи окислительного газа (атомов F) и 34 клиновидных сопла 2 для подачи вторичного разбавителя (молекул He*). Устройство (типа I) для подачи вторичного горючего (молекул H₂) имеет следующую конструкцию: в каждое сопло 2 вторичного разбавителя установлен клиновидный элемент 3 с инжектором, выполненный в виде перфорированной трубки диаметром 1 мм. При этом вторичное горючее подается через 13 отверстий диаметром 0.3 мм, расположенных с шагом 2 мм в трубке 3; оси отверстий параллельны направлению потока окислительного газа из сопел 1 (угол между осями $\gamma = 0$).

В ранее проведенных нами исследованиях HF-НХЛ с двухструйными СБ радиального расширения [5] было показано, что при подаче вторичного горючего под углом 20° к направлению окислительного потока энергетические характеристики лазера возрастали примерно на 20% по сравнению с таковыми при параллельной инжекции. Если подобная закономерность справедлива и для лазера с трехструйным СБ, то появляется реальная возможность поднять его удельный энергосъем.

Для экспериментального подтверждения этого предположения нами было разработано и изготовлено модернизированное устройство (типа II, рис.1,б) подачи вторичного горючего, в котором водород подается через 13 отверстий диаметром 0.3 мм, расположенных с

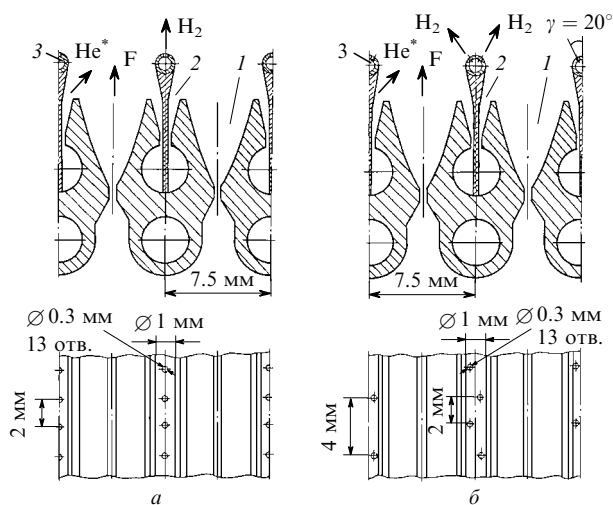


Рис.1. Схемы трехструйных СБ с устройствами подачи вторичного горючего типа I (а) и типа II (б); 1 – сопло окислительного газа; 2 – сопло вторичного разбавителя; 3 – перфорированная трубка для подачи вторичного горючего.

шагом 2 мм в шахматном порядке. При этом оси отверстий в трубках 3 ориентированы под углом $\gamma = 20^\circ$ к направлению потока окислительного газа из сопел 1. В конструкциях обоих СБ реализована схема смешения сопло – сопло – инжектор.

Определение энергетических (мощность излучения N , удельный энергосъем N_Σ) и пространственных (протяженность Δx_1) характеристик HF-НХЛ осуществлялось с помощью метода двойного щелевого резонатора [6]. Система измерения мощности состояла из двух независимых закрытых резонаторов, оптические оси которых параллельны и смещены относительно друг друга на расстояние $\Delta x = 3.5$ см в направлении потока АС. Апертуры резонаторов имели форму прямоугольника высотой 9 см и шириной 4 и 3 см. Глухие сферические зеркала с радиусом кривизны 5 м изготовлены из полированной меди. Каждое зеркало снабжено четырьмя термопарами типа хромель-копель. Мощность лазерного излучения определялась по увеличению температуры зеркал за время генерации, которое задавалось с помощью механического затвора, размещенного между АС и резонаторными зеркалами. Излучение, выведенное через отверстие первого по потоку резонатора, направлялось в малоинерционный приемник типа МГ-30, сигнал с которого регистрировался на светолучевом осциллографе и служил для определения времени генерации. Погрешность измерения мощности лазерного излучения описанным методом не превышает $\pm 7\%$.

Объектом наших исследований являлся маломасштабный (рассчитанный на генерацию излучения мощностью 5–6 кВт) HF-НХЛ с размером выходного сечения СБ 25×2.8 см, размещенный в камере низкого давления, предназначенной для отделения от внешней среды истекающего из НХЛ в режиме свободной струи газового потока. Газодинамическую картину такого потока во многом определяет краевой эффект – взаимодействие потока с окружающей средой. Небольшая (2.8 см) высота сопловой лопатки при достаточно протяженной (~ 10 см) АС не позволяет использовать способ исключения краевого эффекта, предложенный в [7]. В связи с этим при постановке экспериментов по изучению влияния давления были приняты специальные меры (см. рис.2): для уменьшения градиента давления в АС по высоте СБ (по аналогии с [8]) установлены жесткие ограничивающие стенки с углом раскрытия, соответствующим углу раскрытия сопел окислительного газа 2; для снижения влияния вязкости при обтекании стенок сверхзвуковым потоком АС использовано газодинамическое устройство, формирующее параллельные стенкам струи холодного газа. Две жесткие стенки 5 (рис.2) перекрывают область потока АС протяженностью 14.5 см вниз по течению от среза СБ, отделяя ее от окружающего пространства камеры низкого давления, в которой размещен лазер. На расстоянии 2.5 см от среза сопел размещены две группы инжекторов 4, каждая из которых включает 42 осесимметричных сопла для впрыскивания смеси (массовые доли 50% H₂ и 50% N₂). Для «отбора» статического давления из периферийной области потока АС в одной из стенок на расстояниях 4, 6.5 и 12 см от выходного сечения СБ выполнены три дренажных отверстия диаметром 0.5 мм.

Измерения статического давления в центральной области потока АС проводились неохлаждаемым зондом-отборником статического давления типа плоскость –

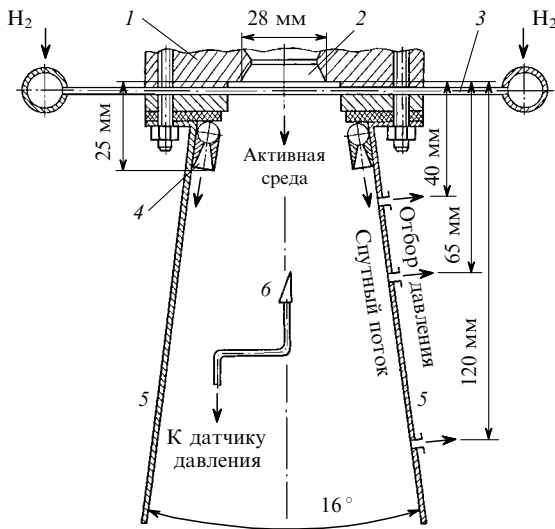


Рис.2. Схема газодинамического устройства с ограничивающими стенками:

1 – сопловой блок; 2 – сопло окислительного газа; 3 – перфорированная трубка для подачи вторичного горючего; 4 – инжектор спутного потока; 5 – ограничивающие стенки; 6 – зонд-отборник статического давления.

клин по методике [9]. Зонд-отборник 6 устанавливался на подвижной платформе, размещенной в камере низкого давления. Платформа в ходе эксперимента дискретно перемещалась относительно среза СБ в направлении потока. Для измерений использовались датчики типа ИКД6ТДа (погрешность $\pm 3\%$), обеспечивающие погрешность определения статического давления не хуже $\pm 10\%$.

3. Результаты экспериментов

Исследования проводились путем сравнительных испытаний HF-НХЛ с устройствами подачи вторичного горючего двух типов (I и II) и включали три этапа. На первом этапе определялось влияние на удельный энергосъем способа подачи вторичного горючего при варьировании его количества, на втором оценивались энергетические характеристики излучения и протяженность АС, а на третьем изучалось влияние давления в АС.

Химический состав топлива в генераторе атомарного фтора во всех экспериментах оставался фиксированным, соответствующим безразмерным коэффициентам $\alpha_1 \approx 1.85$ и $\psi_1 \approx 8.5$. Суммарный массовый расход реагентов на первом и втором этапах исследований поддерживался близким к номинальному (расчетному) – $m = 30$ г/с, а на третьем этапе варьировался от номинального до максимального $m_{\max} = 60$ г/с. При этом пропорционально (от 30 до 60 г/с) увеличивался и массовый расход инжектируемых через газодинамическое устройство газов. Коэффициент вторичного разбавления ψ_2 был принят по результатам предыдущих исследований [1] близким к оптимальному: $\psi_2 = 3 - 5$.

3.1. Влияние количества вторичного горючего

В экспериментах первого этапа при последовательной установке устройств для подачи вторичного горючего типов I и II снимались зависимости мощности лазерного излучения от коэффициента α_2 , который варьировался в диапазоне $\alpha_2 = 4 - 14$. Зависимости удель-

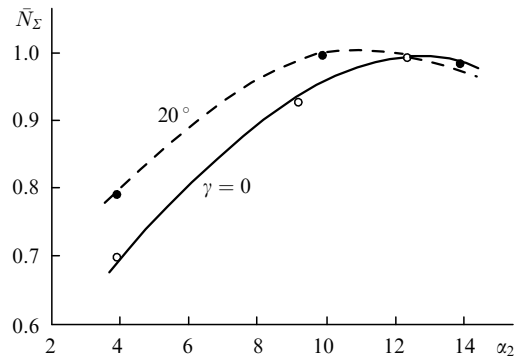


Рис.3. Зависимости нормированного удельного энергосъема \bar{N}_Σ HF-НХЛ с устройством подачи вторичного горючего типа I (сплошная кривая) и типа II (штриховая кривая) от коэффициента избытка вторичного горючего α_2 при разных углах γ .

ного энергосъема HF-НХЛ с устройством каждого типа \bar{N}_Σ , нормированного на соответствующий максимум, показаны на рис.3. Видно, что они различаются: для устройства типа II максимум удельного энергосъема достигается при $\alpha_2 = 11$, тогда как для устройства типа I – при $\alpha_2 = 13$. Иными словами, интенсификация смешения реагентов на выходе из СБ за счет инжекции вторичного горючего под углом $\gamma = 20^\circ$ к направлению потока окислительного газа позволяет достичь максимума удельного энергосъема при массовом расходе водорода, на 20 % меньшем, чем при параллельной инжекции ($\gamma = 0$).

Этот результат имеет понятное объяснение. В условиях диффузионного смешения реагентов (которое имеет место при параллельной инжекции водорода) избыток вторичного горючего способствует увеличению частоты столкновений его молекул с атомами окислителя, ускоряя химическую накачку. При интенсификации смешения аналогичный эффект достигается быстрее, что и позволяет снизить количество водорода.

Хотя в исследованной области изменения коэффициента α_2 обе функции $\bar{N}_\Sigma = f(\alpha_2)$ имеют максимумы, в целом наблюдается достаточно слабое изменение удельного энергосъема при изменении массового расхода вторичного горючего. В частности, двукратное уменьшение расхода водорода относительно оптимального, отвечающего коэффициентам $\alpha_2 = 11$ и 13, приводит к снижению удельного энергосъема на 15 и 20 % соответственно. Аналогичная особенность характерна и для HF-НХЛ с двухструйными СБ [9].

3.2. Энергетические характеристики излучения и протяженность АС

В экспериментах второго этапа (каждый из которых продолжительностью 40–50 с включал четыре-пять режимов, отличавшихся только положением оптических осей резонаторов) резонаторная система перемещалась, что позволяло определить энергетический вклад различных частей АС и одновременно найти протяженность зоны генерации. Результаты экспериментов помещены в табл.1. Из нее видно, что максимальный удельный энергосъем лазера с устройством подачи вторичного горючего типа II оказался на 12 % выше, чем у лазера с устройством типа I. Интересно отметить, что в последнем случае энергосъем ($N_\Sigma = 163$ Дж/г) в точности соответствует полученному нами ранее в [1] в аналогичных условиях. Это свидетельствует о хорошей воспроизводимости результатов экспериментов и подтверждает их досто-

Табл.1. Сравнительные пространственно-энергетические характеристики исследованной модели HF-НХЛ с устройством подачи вторичного горючего двух типов.

Тип устройства	N (кВт)	N_{Σ} (Дж/г)	Δx_L (см)
I ($\gamma = 0$)	5.67	163	10.9
II ($\gamma = 20^\circ$)	6.33	183	9.3

верность. Своеобразной платой за повышенный удельный энергосъем явилось снижение на 15 % протяженности зоны генерации (см. табл.1).

3.3. Влияние давления в АС

Представление о распределении статического давления p_s вдоль направления потока АС при варьировании суммарного массового расхода реагентов дает рис.4. Давления в фиксированных сечениях центральной части АС и спутного потока, примыкающего к ограничивающим стенкам, оказались одинаковыми (темные и светлые точки на кривой для $m = 30$ г/с). Этот факт имеет важное практическое следствие, а именно: поскольку в экспериментах с генерацией лазерного излучения размещение зондов-отборников давления в полости резонатора крайне нежелательно, то о давлении p_s в АС (по крайней мере, на расстояниях $x \geq 4$ см) можно судить по результатам измерений в спутном потоке вблизи ограничивающих стенок.

Рост суммарного массового расхода сопровождается повышением статического давления в потоке АС и темпа его спада вниз по потоку (кривые для $m = 50$ и 60 г/с). Последнее обстоятельство, по-видимому, обусловлено расширением газового потока в плоскости смешения реагентов (в направлении вдоль сопловой решетки), которому не препятствуют ограничивающие стенки. Как видно из распределений на рис.4, статическое давление в объеме резонаторов все-таки не постоянно. По этой причине в качестве его интегральной характеристики нами предложено использовать средневзвешенное давление \bar{p}_s , которое определяется следующим образом:

$$\bar{p}_s = \frac{N_1 p_s' + N_2 p_s''}{N_1 + N_2},$$

где N_1 и N_2 – мощности излучения, генерируемого первым и вторым по потоку резонаторами; p_s' и p_s'' – статические давления в сечениях потока АС, проходящих через оптические оси первого и второго резонаторов.

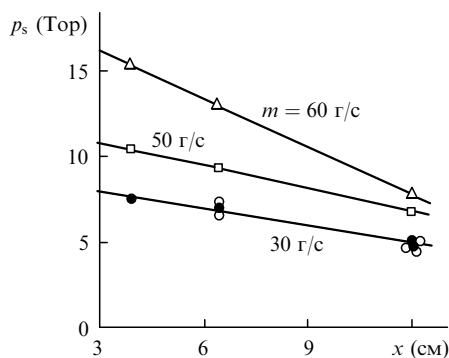


Рис.4. Распределения статического давления p_s в направлении потока АС при измерении зондом-отборником давления в центральной части потока (темные точки) и в спутном потоке вблизи стенки ограничивающей пластины (светлые точки) для разных массовых расходов m .

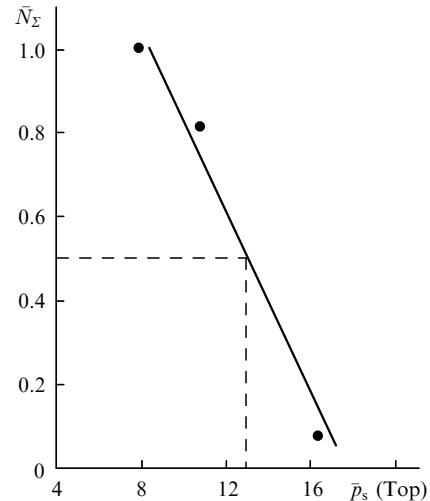


Рис.5. Зависимости нормированного удельного энергосъема \bar{N}_{Σ} HF-НХЛ от средневзвешенного статического давления в полостях резонаторов \bar{p}_s .

Зависимость нормированного удельного энергосъема от давления \bar{p}_s показана на рис.5. Она получена для HF-НХЛ с устройством подачи вторичного горючего типа II. Характер зависимости $\bar{N}_{\Sigma} = f(\bar{p}_s)$ указывает на две особенности. Во-первых, несмотря на интенсификацию смешения реагентов, в исследованном диапазоне давлений она близка к теоретической для лазера с диффузионным механизмом смешения [10]: $\bar{N}_{\Sigma} \sim \bar{p}_s^{-1}$. Во-вторых, потеря 50 % от максимального удельного энергосъема ($N_{\Sigma}^{\max} = 183$ Дж/г) дает возможность работы лазера при более высоком (в 1.6 раза) давлении АС ($\bar{p}_s \sim 13$ Тор).

Что касается потенциальной возможности восстановления полного давления потока АС при использовании HF-НХЛ с трехструйным СБ, интенсифицирующим смешение реагентов, то ее можно оценить на основе данных из [8, 11]. С помощью зависимости, полученной в [8], можно определить реализованное в наших экспериментах давление на выходе диффузора p_d , соответствующее реализованному в наших экспериментах параметрам лазера. Согласно оценкам максимальному удельному энергосъему отвечает давление $p_d \sim 75$ Тор; при снижении N_{Σ} на 50 % от максимального имеется возможность поднять давление p_d вдвое – до ~ 150 Тор. Для дальнейшего восстановления полного давления до атмосферного с помощью газового эжектора в первом случае необходима степень сжатия $\varepsilon_1 \sim 10$, а во втором – $\varepsilon_2 \sim 5$; обеспечение таких степеней сжатия требует соответствующих коэффициентов эжекции: $n_1 = 13.3$ и $n_2 = 6.4$. Эти данные, заимствованные из работы [11], позволяют оценить необходимый массовый расход эжектирующего газа и найти условия для достижения компромисса между давлением газового потока при его выбросе в окружающее пространство и удельным энергосъемом HF-НХЛ.

4. Заключение

Таким образом, выполненные нами эксперименты показали, что интенсификация смешения реагентов в HF-НХЛ с трехструйным СБ, собранным по схеме сопло – сопло – инжектор, путем впрыскивания вторичного горючего под углом 20° к направлению потока окислительного газа позволяет:

– достигнуть максимума удельного энергосъема при массовом расходе водорода, на 20 % меньшем, чем при параллельной инжекции;

– увеличить удельный энергосъем на 12 % при снижении на 15 % протяженности зоны генерации;

– поднять давление в полости резонатора в 1.6 раза, проиграв при этом в удельном энергосъеме в 2 раза.

1. Галаев И.И., Конкин С.В., Кривицкий А.М. и др. *Квантовая электроника*, **23**, 217 (1996).
2. Ротинян М.А., Стрелец М.Х., Федоров И.А., Шур М.Л. *Квантовая электроника*, **25**, 387 (1998).
3. Конкин С.В., Ребонэ В.К., Ротинян М.А., Федоров И.А. и др. *Квантовая электроника*, **25**, 397 (1998).
4. Конкин С.В., Кривицкий А.М., Ребонэ В.К. и др. *ПТЭ*, № 6, 128 (1996).
5. Ребонэ В.К., Ротинян М.А., Федоров И.А. и др. *Квантовая электроника*, **24**, 880 (1997).
6. Галаев И.И., Конкин С.В., Ребонэ В.К., Федоров И.А. *ПТЭ*, № 1, 122 (1997).
7. Конкин С.В., Ребонэ В.К., Ротинян М.А., Федоров И.А. *Квантовая электроника*, **23**, 495 (1996).
8. Wilson L.E., Hook D.L. *AIAA Paper*, № 344 (1976).
9. Федоров И.А. *Непрерывные химические лазеры на рабочих молекулах фтористого водорода и фтористого дейтерия* (С.-Петербург, изд-во Балт. гос. техн. ун-та, 1994, кн.1, 2).
10. Гросс Р., Ботт Дж. (ред.) *Химические лазеры* (М., Мир, 1980).
11. Ortwirth P.J. *AIAA Paper*, № 1217 (1978).