

# Характеристики непрерывного химического HF-лазера, работающего с использованием нового способа получения окислительного газа

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

*Экспериментально исследованы энергетические и спектральные характеристики HF-лазера, который работает с использованием нового способа получения окислительного газа, основанного на принципе двухзонного смешения. В процессе исследования осуществлялось перераспределение суммарного количества инертного разбавителя (гелия), подаваемого в лазер, между газогенератором (первая зона смешения) и дозвуковыми частями сопел соплового блока (вторая зона смешения). При этом температура в газогенераторе поддерживалась постоянной, а эксперименты проводились при условии сохранения неизменным либо массового расхода атомарного фтора, либо давления в газогенераторе. Показано, что при практически полной переброске гелия из первой зоны смешения во вторую в режиме постоянного давления в газогенераторе наблюдается рост мощности лазерного излучения на 70 %, а в режиме постоянного массового расхода атомарного фтора – на 14 % при одновременном повышении удельного энергоотбора на 40 %. Обнаружено увеличение протяженности зоны генерации не менее чем на 35 %.*

**Ключевые слова:** химический лазер, окислительный газ, активная среда.

## 1. Введение

В непрерывных химических HF/DF-лазерах (HF/DF-НХЛ) активная среда создается в процессе смешения формируемых с помощью соплового блока струй окислительного газа (содержит атомы фтора) и вторичного горючего (молекулы водорода или дейтерия) с последующим иницированием реакции накачки  $F + H_2 \rightarrow HF(v) + H$  либо  $F + D_2 \rightarrow DF(v) + D$  в полости резонатора (HF(v) и DF(v) – молекулы продуктов реакции в колебательном возбужденном состоянии;  $v$  – колебательное квантовое число). Свойства активной среды во многом определяются свойствами окислительного газа, который должен содержать максимальное количество атомов фтора (выполняют роль активных центров при иницировании реакций накачки), минимальное количество побочных продуктов (являются дезактиваторами рабочих молекул HF(v) и DF(v)) и обладать возможно более низкой температурой (для снижения скорости релаксации рабочих молекул в активной зоне и улучшения условий для создания инверсии). Окислительный газ получают в специальном газогенераторе.

Известны различные способы получения окислительного газа. Один из них предполагает использование внешнего источника энергии (обычно дугового разряда). В этом случае газогенератором является плазматор с камерой смешения [1], в котором под действием высокой температуры фторсодержащее соединение диссоциирует с образованием атомов фтора и побочных продуктов. К числу способов, основанных на использовании внешних источников энергии, следует отнести дис-

социацию фторсодержащих соединений под действием электрических разрядов других видов – высокочастотного [2], тлеющего [3] и микроволнового [4]. Способ получения окислительного газа с помощью внешнего источника энергии прост и обеспечивает минимальное количество побочных продуктов. Главный его недостаток – высокая энергоемкость, что может создавать проблемы при применении в лазерах большой мощности (особенно для мобильных систем).

Другой способ получения окислительного газа предполагает использование вспомогательной экзотермической химической реакции, которая проводится в газогенераторе. Он не требует внешнего источника энергии и потому является автономным. В настоящее время применяются два варианта реализации такого способа. Первый из них основан на реакции молекулярного фтора с окисью азота:  $F_2 + NO \rightarrow NOF + F$ . Этот вариант реализован в дозвуковых НХЛ и описан в работе [5]. Однако малая скорость и незначительный тепловой эффект реакции приводят к малым степеням диссоциации молекулярного фтора, что обуславливает весьма умеренные энергетические характеристики лазера. Согласно второму (традиционному) варианту [6] газогенератор представляет собой камеру сгорания, в которую через смесительную головку подаются исходные реагенты – первичное горючее, фторсодержащий окислитель и инертный разбавитель. Соотношение расходов окислителя и первичного горючего устанавливается выше стехиометрического. При выполнении этого условия избыточный свободный фтор, содержащийся в продуктах сгорания, которые и представляют собой окислительный газ, будет полностью или частично диссоциирован вследствие повышения температуры смеси (до  $T = 1800 - 2000$  К) за счет тепла, выделяющегося в процессе горения.

Известно [7, 8], что фактором, оказывающим наиболее сильное влияние на эффективность работы HF/DF-лазера, является поступательная температура активной

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

среды  $T$ , превышение которой на 600–650 К подавляет инверсию и вызывает срыв генерации излучения. С целью снижения поступательной температуры в окислительный газ добавляют определенное количество инертного разбавителя (гелия или азота), выполняющего функцию теплового балласта. В традиционном варианте получения окислительного газа весь инертный разбавитель (обычно гелий) подают в камеру сгорания, откуда он, нагретый до температуры диссоциации фторсодержащего окислителя, транспортируется по соплу в полость резонатора в смеси с атомами фтора и продуктами сгорания. К недостатку такого способа следует отнести нагрев всего инертного разбавителя до температуры диссоциации фторсодержащего окислителя, что требует фактически бесполезного расхода части исходных реагентов и сопровождается наработкой дополнительного количества дезактиваторов – невозбужденных молекул  $DF(0)$  или  $HF(0)$ .

Более эффективным является снижение температуры активной среды посредством подачи дополнительного количества холодного инертного разбавителя, например гелия, непосредственно в зону протекания реакции накачки (расположена за камерой сгорания); разбавитель вводится между струями окислительного газа и вторичного горючего [9]. Дополнительный разбавитель снижает поступательную температуру активной среды непосредственно в зоне генерации лазерного излучения, что оказывает благотворное влияние на энергетические характеристики лазера. Однако реализация этого способа приводит к усложнению конструкции соплового блока за счет устройства для подачи дополнительного инертного разбавителя, а последний не удастся использовать в качестве теплового балласта в полной мере, поскольку часть гелия вследствие диффузии смешивается с холодным вторичным горючим.

Целью настоящей работы является исследование характеристик HF-лазера с помощью нового способа получения окислительного газа, который основан на принципе двухзонного смешения и отличается отсутствием нагрева основной массы (либо всего количества) инертного разбавителя до температуры диссоциации фторсодержащего окислителя. Сущность этого способа заключается в том, что приготовленная в газогенераторе (в первой зоне смешения) высокотемпературная смесь, содержащая атомы фтора, а также холодный инертный разбавитель подаются в виде отдельных струй на вход в дозвуковые части сопел соплового блока (во вторую зону смешения). В сверхзвуковых частях сопел эти струи смешиваются в химически неравновесных условиях при замороженном составе смеси. В итоге концентрация атомов фтора остается фактически неизменной, а количество реагентов, необходимое для наработки единицы расхода атомарного фтора, и температура окислительного газа, поступающего в активную зону, уменьшаются.

## 2. Экспериментальная установка и методика исследования

Экспериментальное исследование характеристик HF-NXL с помощью нового способа получения окислительного газа проводилось на стендовой установке, включавшей в себя HF-лазер, системы подачи рабочих реагентов ( $F_2$ ,  $D_2$ ,  $H_2$ , He) и регистрации режимных параметров, а также измерительную систему.

В газодинамическом тракте HF-лазера (рис.1) между

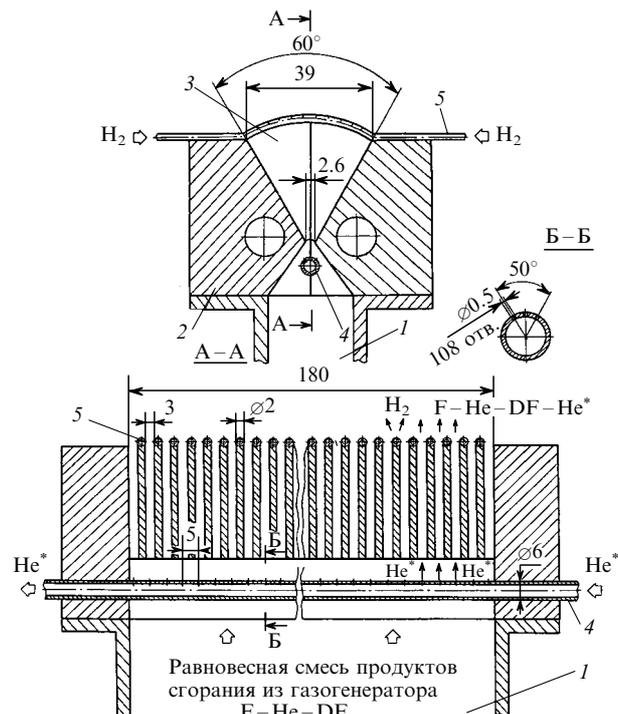


Рис.1. Схема HF-лазера (размеры даны в миллиметрах): 1 – камера сгорания газогенератора; 2 – сопловой блок; 3 – сверхзвуковое сопло; 4 – специальный инжектор для впрыска дополнительного инертного разбавителя (гелия); 5 – трубка подачи вторичного горючего (водорода).

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, предназначенный для впрыска в каждое щелевое сопло шириной 3 мм дополнительного (вторичного) инертного разбавителя (атомы  $He^*$ ). Отверстия размещены в три ряда с шагом в каждом ряду 5 мм, соответствующим шагу сопел (инжектор содержит 108 отверстий). Угол между осями двух смежных отверстий равен  $25^\circ$ . Согласно такой схеме в зону между входом в дозвуковую часть щелевого сопла и его критическим сечением поступают два потока: равновесная смесь перемешанных продуктов сгорания ( $F$ ,  $DF$  и часть молекул  $He$ ) при высокой температуре ( $T \sim 1800 - 2000$  К) из газогенератора и дополнительный инертный разбавитель (атомы  $He^*$ ) при низкой температуре ( $\sim 300$  К) из специального инжектора. Течение в сверхзвуковой части каждого щелевого сопла, сопровождающееся смешением этих двух потоков, имеет химически неравновесный характер [10]. Следовательно, концентрация атомов свободного фтора остается практически неизменной, а в результате смешения потоков в сопле температура окислительного газа понижается, что должно способствовать понижению температуры активной среды и росту энергетических характеристик лазера.

Вторичное горючее (молекулы  $H_2$ ) подается через накладной коллектор, образованный 37 трубками-инжекторами с наружным диаметром 2 мм, которые перфорированы отверстиями диаметром 0,35 мм (в каждой трубке 20 отверстий). Трубки-инжекторы закреплены на кромках щелевых сопел; оси отверстий составляют угол  $20^\circ$  с направлением потока окислительного газа (смесь

F – He – DF – He\*), истекающего из сопел. Размер выходного сечения соплового блока  $180 \times 39$  мм.

В экспериментах применялся устойчивый двухзеркальный сферический резонатор закрытого типа с выводом лазерного излучения через отверстие диаметром 2 мм в одном из зеркал. Использовались медные сферические зеркала размером  $9 \times 9$  см с радиусом кривизны 5 м и полированной отражающей поверхностью (коэффициент отражения  $r = 0.98$ ). Для учета потерь излучения на поглощение каждое зеркало снабжалось четырьмя термopарами типа хромель-копель. Зеркала закреплялись в специальных устройствах, установленных на оптическом столе, который размещался в барокамере. Стол был оснащен приводом, обеспечивающим возможность плавного изменения положения оптической оси резонатора относительно среза соплового блока HF-лазера, размещенного в этой же барокамере. Длина резонатора (расстояние между зеркалами) составляла 1 м. В качестве выводного окна барокамеры использовалась пластина из фтористого кальция диаметром 16 см.

Мощность лазерного излучения, генерируемого в закрытом резонаторе, определялась по методике [11] с погрешностью  $\pm 7\%$ . Мощность лазерного излучения, выведенного из резонатора через отверстие диаметром 2 мм, измерялась приборами двух типов: калориметром Model 201 (фирма Coherent Radiation, США) с погрешностью  $\pm 5\%$  и пирозлектрическим приемником МГ-30 с погрешностью  $\pm 10\%$ . Спектральный состав лазерного излучения определялся с помощью ИК спектрометра на базе монохроматора ИКМ-1. Погрешность измерения относительных интенсивностей спектральных линий таким прибором не превышала  $\pm 5\%$ .

Реагентами служили газообразные фтор (окислитель), дейтерий (первичное горючее), гелий (первичный и вторичный разбавители) и водород (вторичное горючее) в молярном соотношении  $D_2:F_2:He:H_2:He^* = 1:\alpha:\psi_1(\alpha-1):\alpha_2(\alpha-1):\psi_2(\alpha-1)$ , где  $\alpha = n_{F_2}/n_{D_2}$ ;  $\psi_1 = n_{He}/(n_{F_2})_{free}$ ;  $\alpha_2 = n_{H_2}/(n_{F_2})_{free}$ ;  $\psi_2 = n_{He}/(n_{F_2})_{free}$ ;  $(n_{F_2})_{free} = n_{F_2} - n_{D_2}$ ;  $n$  – число молей соответствующего реагента.

При проведении исследований главное внимание уделялось получению зависимостей энергетических характеристик HF-лазера от количества гелия, которое последовательно изымалось из газогенератора (из первой зоны смешения) и направлялось в специальный инжектор для подачи в дозвуковые части сопел соплового блока (во вторую зону смешения). При этом суммарная степень разбавления топливной смеси  $\psi_{\Sigma} = \psi_1 + \psi_2 \sim 13$  сохранялась неизменной (близкой к оптимальной для HF-лазера при использовании традиционного способа получения окислительного газа [12]), а безразмерные коэффициенты  $\psi_1$  и  $\psi_2$  принимали соответственно следующие значения: степень первичного разбавления  $\psi_1 = 13$  (100%), 5.3 (40%), 2.6 (20%), 0.65 (5%) и степень вторичного разбавления  $\psi_2 = 0$  (0%), 7.7 (60%), 10.4 (80%), 12.35 (95%).

Для наглядности представления результатов при построении зависимостей использовался параметр  $\bar{\psi}_1 = [\psi_1/(\psi_1)_0] \times 100\%$  – относительная доля инертного разбавителя в газогенераторе (в первой зоне смешения), где  $\psi_1 = 13$  и  $(\psi_1)_0 = 13$  – степени первичного разбавления при наличии и в отсутствие подачи гелия в специальный инжектор соответственно. Режим работы лазера при  $\bar{\psi}_1 = 100\%$  (когда весь гелий подается в газогенератор) был принят за контрольный. Характеристики именно этого режима сравнивались со всеми остальными. Режи-

мы испытаний, которые проводились при постоянной температуре в газогенераторе, назначались исходя из двух условий: по мере увеличения количества гелия, направляемого в специальный инжектор, сохранялись неизменными либо массовый расход атомарного фтора ( $m_F = const$  с характерными значениями 5.11 и 6.21 г/с) либо давление в газогенераторе ( $P_c = const$  с характерными уровнями 0.12 и 0.14 МПа). Коэффициент избытка вторичного горючего  $\alpha_2$  и суммарный массовый расход реагентов  $m_{\Sigma}$  также поддерживались постоянными:  $\alpha_2 \sim 10$  и  $m_{\Sigma} \sim 30$  г/с, а коэффициент избытка окислителя  $\alpha$  изменялся в диапазоне 1.53 – 2.55.

### 3. Результаты экспериментов

Перейдем к анализу полученных результатов. В специальной серии экспериментов было определено оптимальное положение оптической оси резонатора относительно среза соплового блока, расстояние между которыми  $x_c$  составило 13 мм в отсутствие подачи гелия в специальный инжектор и 17.5 мм при наличии такой подачи. Смещение оптимального положения оптической оси по потоку во втором случае косвенно свидетельствует об увеличении протяженности зоны генерации не менее чем на 35%.

#### 3.1. Энергетические характеристики лазерного излучения

На рис.2 представлены три группы зависимостей энергетических характеристик лазерного излучения от

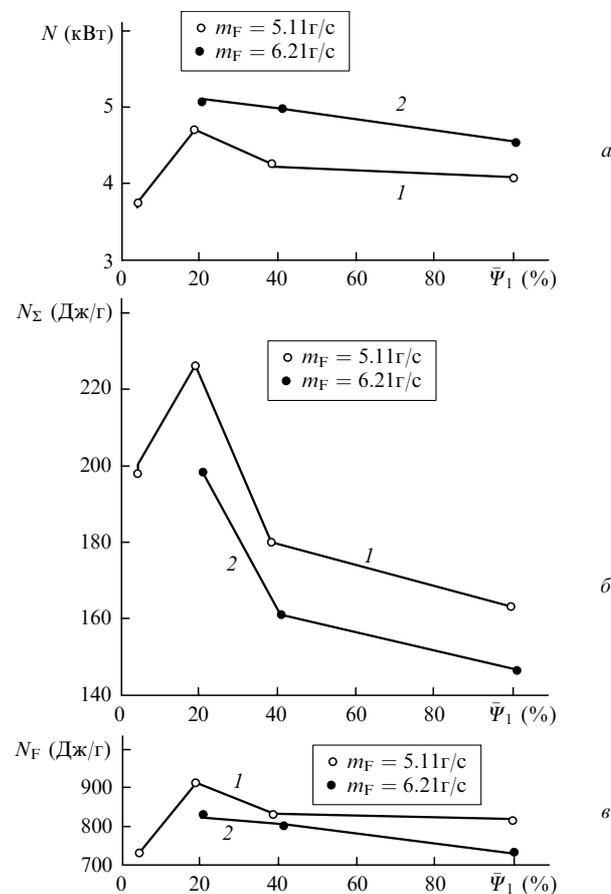


Рис.2. Зависимости мощности лазерного излучения  $N$  (а), а также удельных энергосъемов  $N_{\Sigma}$  (б) и  $N_F$  (в) от относительной доли инертного разбавителя в газогенераторе при  $m_F = 5.11$  и 6.21 г/с.

относительной доли инертного разбавителя в газогенераторе, каждая из которых получена при двух значениях массового расхода атомарного фтора. Все эти зависимости ( $N = f(\bar{\Psi}_1)$ ,  $N_\Sigma = f(\bar{\Psi}_1)$  и  $N_F = f(\bar{\Psi}_1)$ ) по мере снижения относительной доли гелия в первой зоне смешения отражают рост энергии излучения лазера (вплоть до  $\bar{\Psi}_1 = 20\%$ ). Так, мощность лазерного излучения  $N$  и удельный энергоём в расчете на массовый расход атомарного фтора  $N_F$  повышаются на 10%–12% (рис.2,а, в), а удельный энергоём в расчете на суммарный массовый расход реагентов  $N_\Sigma$  возрастает на 32%–35%, достигая при  $m_F = 5.11$  г/с значения 226 Дж/г (рис.2,б, кривая 1). При дальнейшем снижении  $\bar{\Psi}_1$  до 5% наблюдается спад всех энергетических характеристик (рис.2, кривые 1). Однако если мощность лазерного излучения  $N$  при  $\bar{\Psi}_1 = 5\%$  снижается на 13% от ее значения в контрольном режиме при ( $\bar{\Psi}_1 = 100\%$ ), то удельный энергоём  $N_\Sigma$  превышает этот уровень на 15%. При этом количество молекулярного фтора, необходимое для наработки одного грамма атомарного фтора, уменьшается в 1.8 раза, количество дейтерия – в три раза, а количество фтористого дейтерия (релаксанта рабочих молекул HF(v)) – также в три раза. Последнее обстоятельство весьма важно с точки зрения эксплуатации реальной лазерной установки, т. к. позволяет сократить запас реагентов, улучшить массогабаритные характеристики систе-

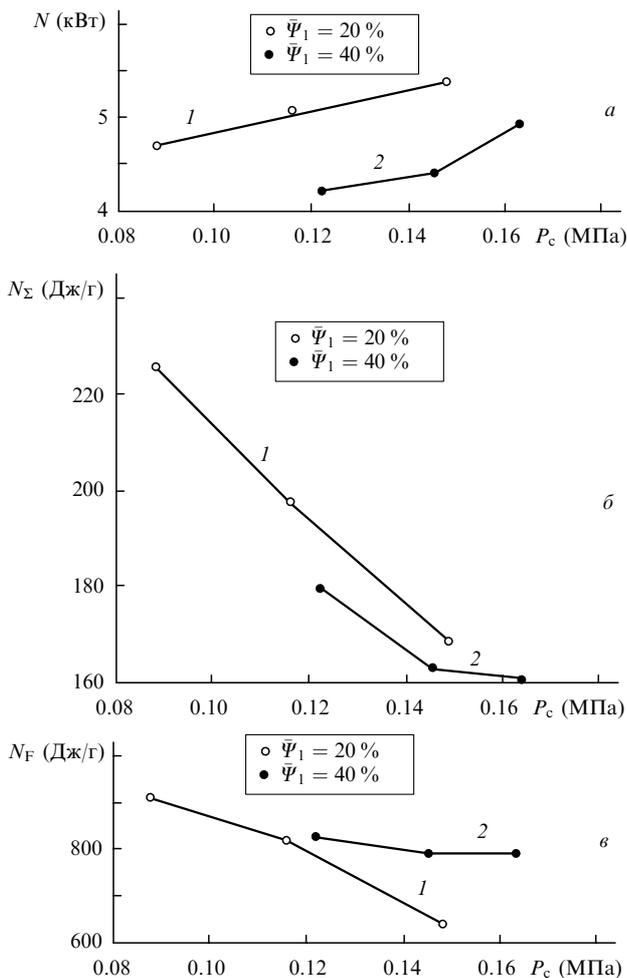


Рис.3. Зависимости мощности лазерного излучения  $N$  (а), а также удельных энергоёмов  $N_\Sigma$  (б) и  $N_F$  (в) от давления в газогенераторе при  $\bar{\Psi}_1 = 20\%$  и  $40\%$ .

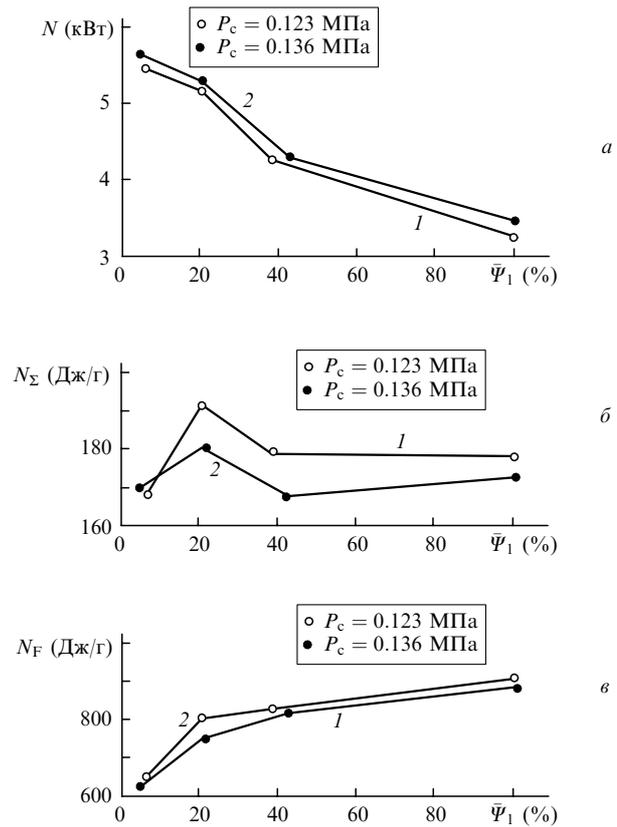


Рис.4. Зависимости мощности лазерного излучения  $N$  (а), а также удельных энергоёмов  $N_\Sigma$  (б) и  $N_F$  (в) от относительной доли инертного разбавителя в газогенераторе при  $P_c = 0.123$  и  $0.136$  МПа.

мы хранения установки, снизить ее стоимость и повысить безопасность использования.

Рис.3 иллюстрирует влияние давления в газогенераторе на энергетические характеристики HF-лазера при относительной доле гелия  $\bar{\Psi}_1 = 20\%$  и  $40\%$ . В исследованных диапазонах изменения  $P_c = 0.088 - 0.148$  МПа (при  $\bar{\Psi}_1 = 20\%$ ) и  $P_c = 0.122 - 0.163$  МПа (при  $\bar{\Psi}_1 = 40\%$ ) по мере роста давления наблюдается плавное, практически линейное нарастание мощности лазерного излучения  $N$  (рис.3,а).

Полученные зависимости позволили описать вариации энергетических характеристик лазера во всем исследованном диапазоне изменения относительной доли гелия  $\bar{\Psi}_1$  (от 5% до 100%) при давлениях в газогенераторе  $P_c = 0.123$  и  $0.136$  МПа. Они представлены на рис.4. Так, например, при  $P_c = 0.123$  МПа в процессе снижения  $\bar{\Psi}_1$  от 100% до 5% наблюдается рост мощности лазерного излучения  $N$  от 3.2 до 5.5 кВт, что отвечает абсолютному приросту мощности на 70% (рис.4,а, кривая 1). Этот результат представляется очень важным, поскольку именно он наглядно демонстрирует высокую энергетическую эффективность нового способа получения окислительного газа.

Удельный энергоём  $N_\Sigma$  в диапазоне изменения  $\bar{\Psi}_1$  от 100% до 20% слабо (на 8%) растет с последующим таким же слабым (на 12%) спадом в диапазоне изменения  $\bar{\Psi}_1$  от 20% до 5% (рис.4,б, кривая 1). То есть фактически  $N_\Sigma$  не претерпевает каких-либо существенных изменений. По мере снижения относительной доли гелия  $\bar{\Psi}_1$  удельный энергоём  $N_F$  уменьшается, составляя при  $\bar{\Psi}_1 = 5\%$  примерно 70% своего значения при  $\bar{\Psi}_1 = 100\%$ . С умень-

шением  $\bar{\Psi}_1$  темп падения  $N_F$  возрастает, достигая максимума в интервале  $\bar{\Psi}_1 = 20\% - 5\%$  (рис.4, в). Подобный характер поведения функции  $N_F = f(\bar{\Psi}_1)$  с учетом неизменного количества разбавителя, приходящегося на единицу массового расхода свободного фтора ( $\psi_\Sigma = 13$  при  $\bar{\Psi}_1 = 100\%$  и  $\psi_\Sigma = 14$  при  $\bar{\Psi}_1 = 5\%$ ), при одинаковых давлении и температуре торможения в газогенераторе, а также в условиях снижения температуры окислительного потока при его смещении в полости сопла с холодным дополнительным (вторичным) гелием указывает на наличие значительных потерь атомарного фтора. Эти потери могут быть связаны как с большими тепловыми потерями в газогенераторе, так и, возможно, с конструкцией специального инжектора для впрыска гелия во вторую зону смешения. В отдельных экспериментах было установлено, что потери атомарного фтора на специальном инжекторе (в опытах с использованием моделирующей его глухой трубки) приводили к дополнительным ( $\sim 15\%$ ) потерям мощности лазерного излучения.

На рис.5,а,б представлены экспериментальные и расчетные зависимости мощности лазерного излучения  $N = f(\bar{\Psi}_1)$  и удельного энергосъема  $N_F = f(\bar{\Psi}_1)$  при давлении в газогенераторе  $P_c = 0.123$  МПа. Они демонстрируют существенное расхождение, которое увеличивается по мере снижения относительной доли первичного разбавителя. Следует отметить, что в расчетных зависимостях не учитываются дополнительные потери атомарного фтора. По этой причине они представляют собой оценку максимально достижимых энергетических характеристик лазера, т. е. оценку сверху, которая показывает, что при практически полной переброске гелия из первой зоны смешения во вторую (т. е. при  $\bar{\Psi}_1 = 5\%$ ) мощность лазерного излучения  $N$  могла бы возрасти в четыре раза (кривая 1 на рис.5,а), а удельный энергосъем  $N_F$  – в 1.6 раза (кривая 1 на рис.5,б). Однако значительные потери атомарного фтора, имеющие место в эксперименте, не позволили в полной мере реализовать столь высокий потенциал.

Рассмотрим возможные причины потерь атомарного фтора и оценим их влияние. Сначала определим, как изменяется время пребывания продуктов сгорания  $t = L_c/U$  в газогенераторе ( $L_c$  – длина камеры сгорания,  $U$  – скорость течения продуктов сгорания). Результаты оценочного расчета показывают, что по мере снижения относительной доли гелия  $\bar{\Psi}_1$  время  $t$  по сравнению с временем контрольного режима  $t_0$  растет и при  $\bar{\Psi}_1 = 5\%$  увеличивается примерно в 2.2 раза (рис.5,з), что прямо указывает на значительный рост тепловых потерь в газогенераторе.

Затем на основе имеющихся опытных данных оценим реальные тепловые потери. Для этого воспользуемся коэффициентом полноты давления  $\varphi_\beta = \mu(\beta_{\text{exp}}/\beta_{\text{th}})$ , где  $\beta_{\text{exp}}$ ,  $\beta_{\text{th}}$  – измеренная в эксперименте и рассчитанная [13] величины расходного комплекса;  $\mu$  – коэффициент расхода сопел (при минимальных тепловых потерях  $\varphi_\beta = 0.96 - 0.98$ ). Анализ результатов этих оценок, которые представлены на рис.5,в в виде функции  $\varphi_\beta = f(\bar{\Psi}_1)$ , приводит к следующим выводам. Во-первых, характер изменения функций  $\varphi_\beta = f(\bar{\Psi}_1)$  и  $t/t_0 = f(\bar{\Psi}_1)$  диаметрально противоположен. Этот факт свидетельствует о том, что увеличение времени пребывания продуктов сгорания в газогенераторе по мере снижения относительной доли гелия в первой зоне смешения вызывает значительный рост тепловых потерь в ней. Во-вторых, кривая  $\varphi_\beta = f(\bar{\Psi}_1)$  практически идентична кривой  $N_F = f(\bar{\Psi}_1)$  –

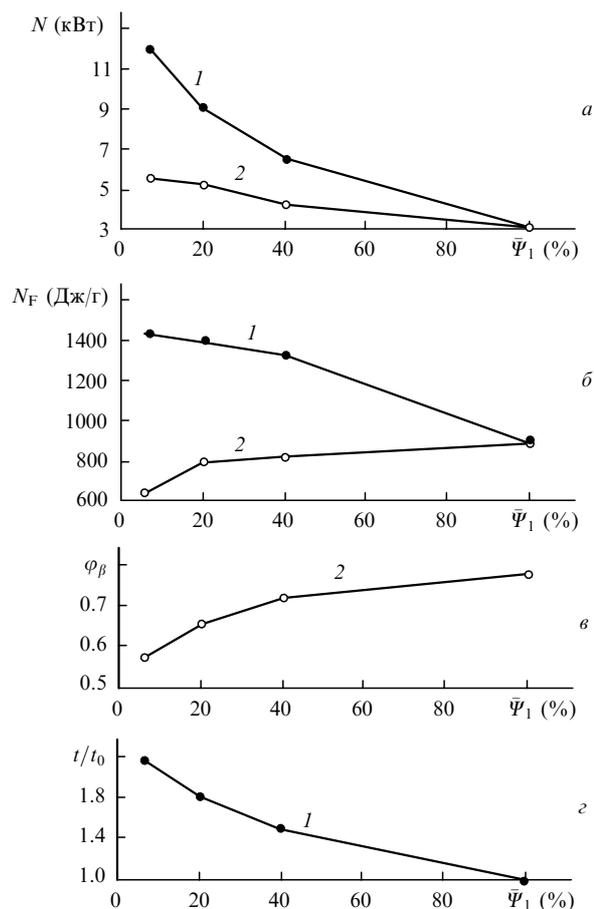


Рис.5. Расчетные (1) и экспериментальные (2) зависимости мощности лазерного излучения  $N$  (а), удельного энергосъема  $N_F$  (б), коэффициента полноты давления  $\varphi_\beta$  (в) и относительного времени пребывания продуктов сгорания  $t$  в газогенераторе (з) от относительной доли в нем инертного разбавителя;  $P_c = 0.123$  МПа.

рис.4,в. Данное обстоятельство означает, что основной причиной снижения удельного энергосъема  $N_F$  (и связанной с ним мощности лазерного излучения  $N$ ) является уменьшение количества атомарного фтора, поступающего в область формирования активной среды, вследствие его рекомбинации. Последняя вызвана большими тепловыми потерями (низкими значениями  $\varphi_\beta$ , составляющими 0.56–0.72) и почти двукратным увеличением времени контакта атомарного фтора с каталитически активными стенками газогенератора, изготовленного из медного сплава. Увеличением темпа роста тепловых потерь и времени пребывания продуктов сгорания в газогенераторе по мере снижения относительной доли гелия, поступающего через смесительную головку, объясняется, очевидно, и возрастание различий между экспериментальной и расчетной кривыми функций  $N = f(\bar{\Psi}_1)$  и  $N_F = f(\bar{\Psi}_1)$  (рис.5,а,б).

### 3.2. Спектральные распределения мощности лазерного излучения

При работе лазера с закрытым резонатором число спектральных линий доходит до пятнадцати,  $P_0(6 - 13)$  в полосе  $1 \rightarrow 0$  и  $P_1(6 - 12)$  в полосе  $2 \rightarrow 1$ , а диапазон длин волн составляет 2.707–3.096 мкм. Обработка спектров генерации, полученных при условии постоянства массового расхода атомарного фтора ( $m_F = 5.11$  г/с), дала возможность проследить за поведением наиболее интенсив-

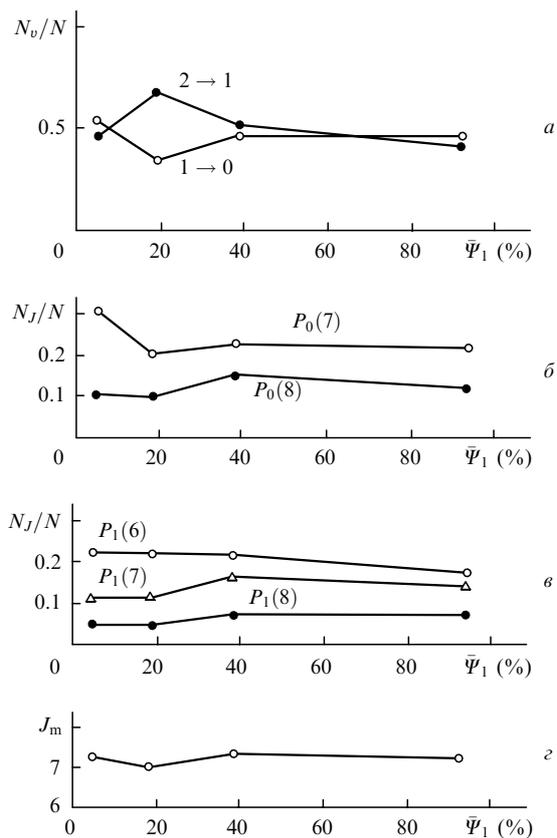


Рис.6. Зависимости спектральных распределений мощности лазерного излучения в колебательных полосах  $N_v/N$  (а) и на отдельных вращательных переходах  $N_J/N$  (б,в), а также средневзвешенного по спектру вращательного квантового числа  $J_m$  (z) от относительной доли инертного разбавителя в газогенераторе при  $m_F = 5.11$  г/с.

ных спектральных линий  $P_0(7, 8)$  и  $P_1(6 - 8)$ , рис.6,б,в. По мере снижения относительной доли разбавителя  $\bar{\Psi}_1$  (увеличения степени вторичного разбавления  $\psi_2$ ) относительные мощности излучения линий  $P_0(8)$  и  $P_1(7, 8)$  монотонно затухают до уровня относительной мощности  $N_J/N = 0.05 - 0.1$ . Мощность линии  $P_0(7)$  сначала затухает, а затем, начиная с  $\bar{\Psi}_1 = 20\%$ , резко усиливается. Относительная мощность линии  $P_1(6)$  во всем диапазоне изменения  $\bar{\Psi}_1$  практически неизменна. Распределение спектральной мощности излучения по колебательным полосам (рис.6,а) для каждой из полос диаметрально противоположно, причем при  $\bar{\Psi}_1 = 20\%$  доля мощности лазерного излучения, заключенная в полосе  $2 \rightarrow 1$ , максимальна (53.5%), а в полосе  $1 \rightarrow 0$  – минимальна (46.5%). Средневзвешенное по спектру вращательное квантовое число  $J_m = \sum J_i N_i / \sum N_i$  ( $J_i$ ,  $N_i$  – вращательное квантовое число и мощность  $i$ -й спектральной линии) также минимально при  $\bar{\Psi}_1 = 20\%$  (рис.6,з). Такое поведение спектральных характеристик может быть связано с тем, что при относительной доле инертного разбавителя  $\bar{\Psi}_1 = 20\%$  (когда в специальный инжектор гелия пода-

ется  $\sim 80\%$  от его общего расхода) температура активной среды минимальна. При этом условия для создания инверсии более благоприятны, чем и объясняется максимальный прирост энергетических характеристик HF-лазера (кривые 1 на рис.2).

#### 4. Заключение

Использование нового способа получения окислительного газа позволило существенно (в 1.4–1.7 раза) повысить энергетические характеристики HF-лазера. Продемонстрирована высокая эффективность способа, состоящего в снижении как количества исходных рабочих реагентов, необходимого для наработки одного грамма атомарного фтора, так и продуктов их сгорания, являющихся релаксантами рабочих молекул HF(v). Выявлены причины, не позволившие повысить энергетические характеристики лазера исследованной маломасштабной (рассчитанной на расход  $m_\Sigma \sim 30$  г/с) конструкции более чем в 1.4–1.7 раза, к которым следует отнести потери атомарного фтора, обусловленные высоким уровнем тепловых потерь в камере сгорания газогенератора и длительным временем пребывания в ней продуктов сгорания. Для дальнейшего повышения энергетических характеристик лазера необходима геометрически более масштабная (рассчитанная на расход  $m_\Sigma = 150 - 200$  г/с) модель, конструкция которой в наиболее полной степени отвечает предложенному способу получения окислительного газа и обладает минимальными потерями атомарного фтора за счет снижения относительной доли тепловых потерь.

Авторы выражают благодарность С.В.Конкину и Ю.Л.Самотоеву за помощь в проведении экспериментов.

1. Sontag A., Joeckle R. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1810**, 286 (1992).
2. Glase J.A. *Appl. Phys. Lett.*, **19**, 135 (1971).
3. Hinchey J.J., Banas C.M. *Appl. Phys. Lett.*, **17**, 386 (1970).
4. Gagne J.M., Bertrand L., Conturic J., Mak S.A. *J. Opt. Soc. Am.*, **65**, 876 (1975).
5. Shirley J.A., Sileo R.N., Stephens R.R., Cool T.A. *AIAA Paper*, № 27 (1971).
6. Schulman E.R., Burwell W.G., Meinzer R.A. *AIAA Paper*, № 546 (1974).
7. Гросс Р. и Ботт Дж. (ред.). *Химические лазеры* (пер. с англ. под ред. А.Н. Ораевского) (М.: Мир, 1980).
8. Ребонэ В.К., Ротинян М.А., Федоров И.А. *Квантовая электроника*, **23**, 707 (1996).
9. Конкин С.В., Галаев И.И., Кривицкий А.М. и др. *Квантовая электроника*, **23**, 217 (1996).
10. Бассина И.А., Дорот В.Л., Стрелец М.Х. *Изв. АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа*, **3**, 120 (1979).
11. Федоров И.А. *Непрерывные химические лазеры на рабочих молекулах фтористого водорода и фтористого дейтерия. Кн.2* (С.-Петербург: изд-во Балт. гос. техн. ун-та, 1994).
12. Конкин С.В., Ребонэ В.К., Ротинян М.А., Федоров И.А. *Квантовая электроника*, **24**, 880 (1996).
13. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. *Теория ракетных двигателей* (М.: Машиностроение, 1980).