

# Исследование динамики пространственно-энергетических и спектральных характеристик непрерывного химического HF-лазера с трехструйным сопловым блоком

И.А.Федоров, С.В.Конкин, Ю.П.Максимов, А.А.Беляев, Н.Е.Третьяков, А.Л.Эцина

*Экспериментально исследовано развитие пространственно-энергетических и спектральных характеристик непрерывного химического HF-лазера с трехструйным сопловым блоком, выполненным по схеме смещения сопло – сопло – сопло, в зависимости от степени вторичного разбавления активной среды гелием. Показано, что энергетические и спектральные характеристики лазерного излучения нестабильны во времени и зависят от конфигурации резонатора, протяженность зоны генерации при вторичном разбавлении достигает 10–12 см, а величина «отрыва» начала этой зоны от среза соплового блока не зависит от степени разбавления. Продемонстрирована возможность селекции спектральных линий при варьировании положения оптической оси резонатора и степени вторичного разбавления.*

**Ключевые слова:** химический лазер, сопловой блок, пространственно-энергетические характеристики.

## 1. Введение

В работах [1, 2], посвященных численному и экспериментальному исследованию сверхзвукового непрерывного химического HF-лазера (HF-НХЛ) с трехструйным сопловым блоком (СБ), выполненным по схеме смещения реагентов сопло – сопло – сопло, показано, что дополнительное (вторичное) разбавление активной среды (АС) инертным газом (гелием) при его подаче непосредственно в область формирования АС эффективно регулирует такие характеристики лазера, как протяженность зоны генерации, величина «отрыва» начала этой зоны от среза СБ, удельный энергосъем, распределение плотности мощности излучения в поперечном сечении пучка. В частности, при использовании метода двойного щелевого резонатора [3] зарегистрирована зона генерации с максимальной протяженностью 11 см, а в широкоапертурном устойчивом плоскоферическом резонаторе удалось получить выходной пучок лазерного излучения с близким к квадратному сечением размером  $10 \times 11$  см.

Для детального анализа закономерностей работы такого лазера большой практический интерес представляет информация о динамике развития пространственно-энергетических характеристик его излучения в ближней зоне. Получить такую информацию можно, например, с помощью анализатора пучка сканирующего типа, который и был использован в настоящем исследовании. С помощью этого прибора изучалась временная эволюция геометрических размеров поперечного сечения пучка лазерного излучения, распределение плотности мощности в нем, а также ориентация зоны генерации относительно среза СБ при различных конфигурациях резонатора в зависимости от степени вторичного разбавления АС. Одновременно был исследован спектральный состав лазерного излучения, генерируемого в различных областях АС.

## 2. Экспериментальная техника

Эксперименты проводились с автономным киловаттным сверхзвуковым HF-НХЛ, оснащенным трехструйным СБ, выполненным по схеме смещения сопло – сопло – сопло с шагом сопел 16 мм и выходным сечением  $11 \times 40$  см [2]. НХЛ был размещен в камере низкого давления, предназначенной для отделения от внешней среды истекающего из него газового потока. В качестве рабочих реагентов использовались газообразные дейтерий, фтор, гелий и водород в молярном отношении  $D_2 : F_2 : He : H_2 : He^* = 1 : \alpha_1 : \psi_1(\alpha_1 - 1) : \alpha_2(\alpha_1 - 1) : \psi_2(\alpha_1 - 1)$  с суммарным массовым расходом  $m = 105 - 125$  г/с. В ходе экспериментов часть безразмерных коэффициентов оставалась фиксированной ( $\psi_1 \sim 10$ ,  $\alpha_2 \sim 40$ ), а часть варьировалась ( $\alpha_1 = 1.54 - 1.77$ ,  $\psi_2 = 0 - 9$ ).

В экспериментах использовались резонаторы трех типов (рис.1). Двухапертурный резонатор представляет собой двойную щелевую систему [3], образованную независимыми резонаторами, оптические оси которых параллельны и смещены относительно друг друга на величину  $\Delta x = x_2 - x_1 = 4.5$  см в направлении потока АС. Апертуры резонаторов имели форму прямоугольника высотой 11 см и шириной  $d_1$  и  $d_2$ . Глухое зеркало представляло собой комбинацию из двух медных зеркал 3 и 4 с радиусом кривизны 5 м и сомкнутыми апертурами размером  $d_1 = 5$  см и  $d_2 = 4$  см (рис.1,а). В качестве выходного зеркала 5 использовалась плоскопараллельная пластина из фтористого кальция диаметром 18 см с диэлектрическим покрытием (коэффициент пропускания  $\tau$  на  $\lambda = 2.7$  мкм составлял 30%). Эксперименты проводились при  $x_1 = 2.5, 4$  и 6 см. В качестве параметра, характеризующего протяженность АС, была принята выходная мощность лазерного излучения (ее продольное распределение), генерируемого при трех указанных положениях резонатора.

Плоскопараллельный резонатор Фабри – Перо (рис.1, б) был образован вынесенным из камеры низкого давления 1 глухим плоским медным зеркалом 9 размером  $15 \times 30$  см и плоскопараллельной пластиной 5. Устойчи-

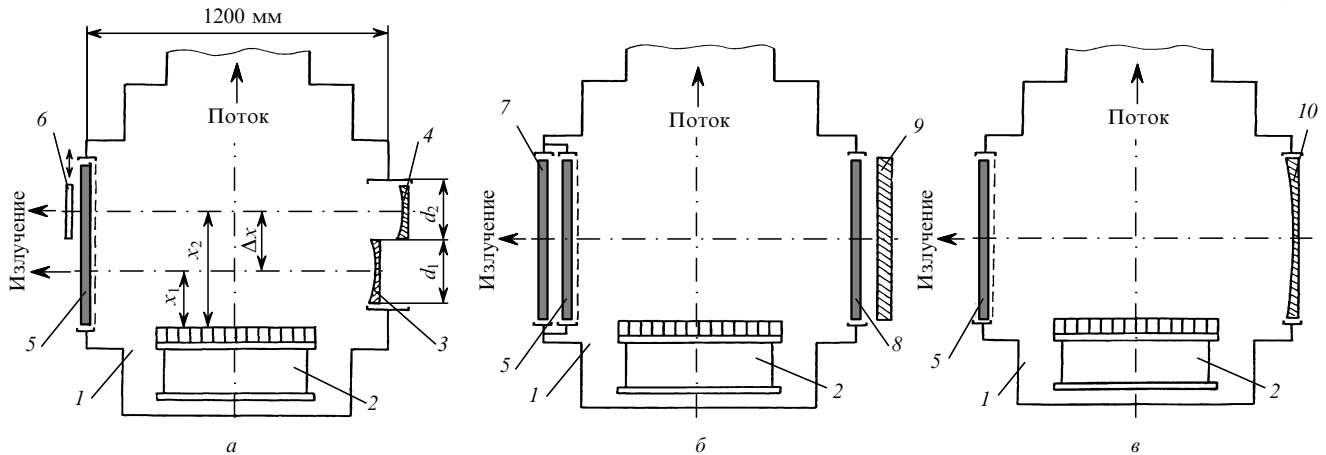


Рис. 1. Схемы двухапертурного щелевого (а), плоскопараллельного (б) и плоскосферического (в) оптических резонаторов: 1 – камера низкого давления; 2 – HF-НХЛ; 3, 4, 10 – глухие сферические зеркала; 5 – выводная плоскопараллельная пластина с диэлектрическим покрытием; 6 – механический затвор; 7, 8 – защитные окна; 9 – глухое плоское зеркало.

вый плоскосферический резонатор (рис.1,в) состоял из глухого медного зеркала 10 размером  $15 \times 15$  см с радиусом кривизны 20 м и плоскопараллельной пластины 5.

В ходе испытаний измерялись выходная мощность лазерного излучения  $N$  (малоинерционным преобразователем мощности ПМ-60 с погрешностью  $\pm 10\%$  и быстродействующим преобразователем мощности УКПИ-1 с погрешностью  $\pm 5\%$ ) и мощности отдельных спектральных линий  $N_j$  (спектрометром на базе монохроматора ИКМ-1). Пространственно-энергетические характеристики излучения, генерируемого плоскопараллельным и плоскосферическим резонаторами, оценивались в ближней зоне с помощью анализатора пучка сканирующего типа (сканирование осуществлялось парой щелей, ориентированных во взаимно перпендикулярных направлениях) [4]. В результате обработки показаний этого прибора определялись распределение интенсивности излучения, величина «отрыва» зоны генерации от среза СБ и ее протяженность.

### 3. Экспериментальные результаты

Выполненные нами исследования проводились в три этапа, в каждом из которых использовался резонатор определенной конфигурации, обеспечивающий генерацию излучения HF-НХЛ, работающего в двух режимах: при наличии вторичного разбавления АС гелием ( $\psi_2 > 0$ ) и при его отсутствии ( $\psi_2 = 0$ ).

#### 3.1. Энергетические характеристики лазерного излучения

Установлено, что при работе лазера с двухапертурным резонатором выходная мощность излучения, выведенного из каждого резонатора, зависит от коэффициента избытка окислителя  $\alpha_1$ . Так, при  $\alpha_1 < 1.7$  из первого по потоку резонатора выведена большая мощность излучения, чем из второго, а при  $\alpha_1 > 1.7$  эта мощность либо сопоставима с выведенной из второго резонатора, либо меньше нее. Причина этой зависимости может состоять в следующем. Оценки показывают, что время, за которое возбужденные молекулы HF(v) преодолевают полость первого резонатора ( $d_1 = 5$  см), составляет  $10^{-6} - 10^{-5}$  с, а время их релаксации в условиях эксперимента равно  $\sim 10^{-7}$  с. Следовательно, возбужденные молекулы, обра-

зовавшиеся в полости первого резонатора и не успевшие передать свою энергию индуцированному излучению, теряют ее за счет релаксации, поступают во второй резонатор в основном состоянии и не принимают участия в генерации. Во втором же резонаторе излучение генерируется исключительно за счет возбужденных молекул HF(v), нарабатанных в его полости. Поскольку число атомов фтора, выполняющих роль активных центров при инициировании реакции накачки  $F + H_2 \rightarrow HF(v) + H$ , непосредственно зависит от коэффициента  $\alpha_1$ , то чем выше  $\alpha_1$ , тем больше нарабатывается атомов фтора и, соответственно, выше выходная мощность излучения. С ростом коэффициента вторичного разбавления  $\psi_2$  выходная мощность излучения увеличивается от 5.7 кВт (при  $\psi_2 = 0$ ) до  $\sim 7$  кВт (при  $\psi_2 = 8.5$ ). Эти результаты несколько уступают полученным ранее в [2]. Одной из возможных причин рассогласования может быть неоптимальное пропускание выходного зеркала  $\tau = 30\%$  (в [2] оно было существенно ниже:  $\tau = 18\%$ ).

При использовании плоскосферического резонатора получена выходная мощность излучения, сопоставимая с достигнутой в двухапертурном резонаторе, что подтверждает правильность наших оценок. В плоскопараллельном резонаторе получены низкие (менее 2 кВт) выходные мощности излучения, что связано с его конфигурацией в виде полувыносной системы, в которой перед глухим зеркалом 9 размещено защитное окно 8, представляющее собой источник значительных потерь (рис.1,б).

#### 3.2. Пространственные характеристики АС

Как известно [1, 2], главными следствиями вторичного разбавления АС гелием (молекулами He\*) являются уменьшение скоростей диффузии струй вторичного горючего (молекул  $H_2$ ) в поток окислительного газа (содержащего атомы F), протекания реакций накачки и релаксации колебательной энергии, а также снижение поступательной температуры АС и, в соответствии с этим, сохранение инверсии на большей длине. Эти следствия еще раз подтверждаются результатами экспериментов, выполненных с использованием двухапертурного резонатора. По мере увеличения коэффициента  $\psi_2$  область АС с максимальным усилением смещается вниз по потоку от среза СБ от координаты  $x_{\max} \sim 2.5$  см (при  $\psi_2 = 0$ ) до координаты  $x_{\max} \sim 7$  см (при  $\psi_2 \sim 8.5$ ). Одно-

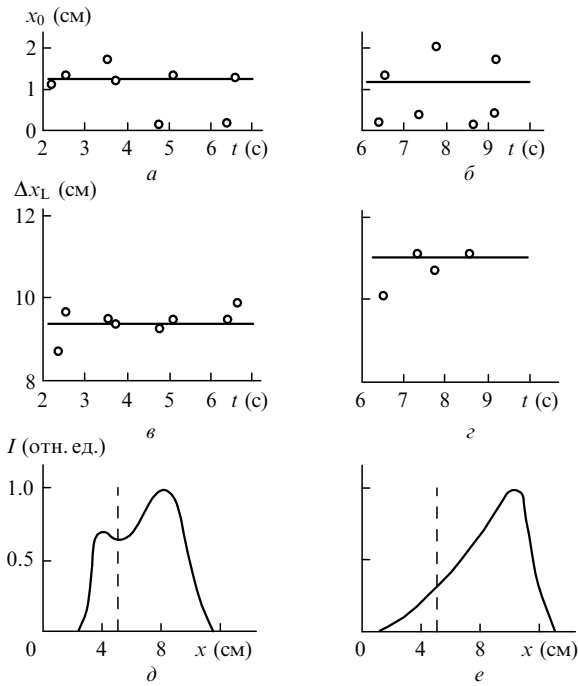


Рис.2. Временная динамика пространственных характеристик зоны генерации HF-НХЛ (а-з) и распределения интенсивности излучения в направлении течения АС (д, е) при использовании плоскопараллельного резонатора и коэффициентах вторичного разбавления  $\psi_2 = 0$  (а, в, д) и 9 (б, з, е).

временно дальняя граница АС сдвигается в том же направлении почти на 1 см: от координаты  $x_L = 10$  см до координаты  $x_L = 11$  см. Эти данные хорошо коррелируют с полученными ранее в [2] результатами и подтверждают их достоверность.

Временную динамику пространственных характеристик АС в плоскопараллельном резонаторе можно проследить на рис.2. Видно, что в обоих режимах работы лазера имеет место «отрыв» начала зоны генерации от среза СБ, характеризующийся координатой  $x_0$  (рис.2,а,б). В режиме, соответствующем  $\psi_2 = 0$ , этот «отрыв» возникает из-за большого расстояния между осями сопел окислительного газа и вторичного горючего (большого шага сопел), а также ввиду наличия незаполненных сопел вторичного гелия (донный эффект). В режиме, соответствующем  $\psi_2 \sim 9$ , донные области отсутствуют, однако имеет место разделение потоков реагентов дополнительной прослойкой гелия. Поскольку последствия этих эффектов примерно одинаковы, то и «отрыв» начала активной зоны от среза СБ в обоих режимах работы лазера один и тот же:  $x_0 = 1.1 - 1.2$  см. Протяженность зоны генерации  $\Delta x_L$  (рис.2,в,з) при  $\psi_2 \sim 9$  составляет  $\sim 11$  см и превышает таковую при  $\psi_2 = 0$  примерно на 2 см. В отсутствие подачи вторичного гелия максимум продольного распределения интенсивности излучения соответствует координате  $x_{max} = 8$  см (рис.2,д); при подаче вторичного разбавителя этот максимум смещается вниз по потоку до координаты  $x_{max} = 10$  см (рис.2,е). Так как распределение интенсивности излучения на выходном зеркале плоскопараллельного резонатора соответствует распределению коэффициента усиления АС, то с помощью зависимостей, показанных на рис.2,д,е, были выбраны оптимальные положения оптической оси плоскосферического резонатора для обоих режимов работы лазера.

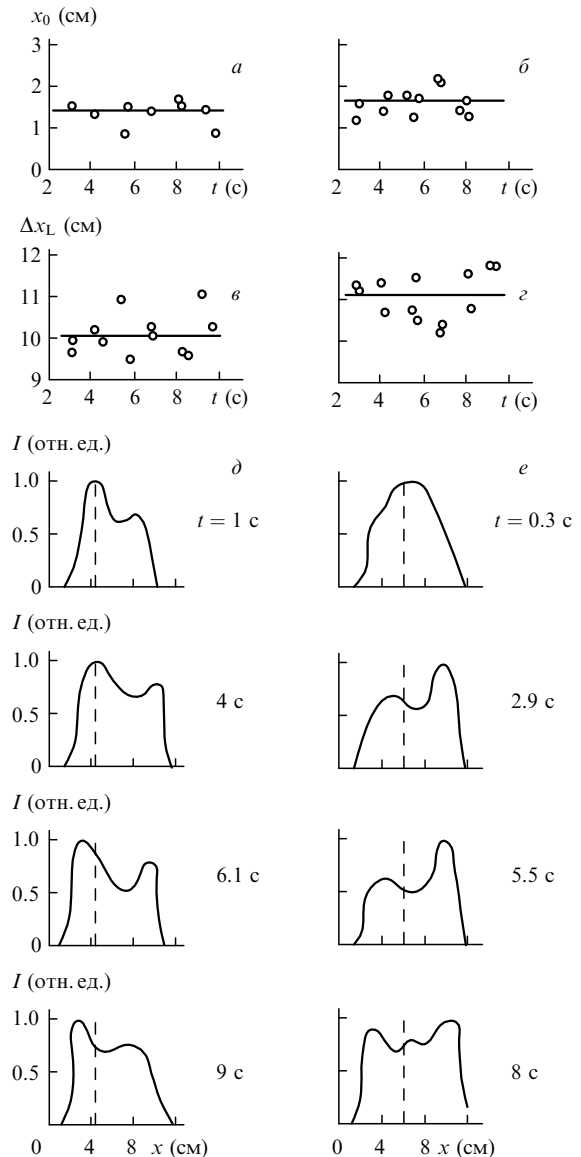


Рис.3. Временная динамика пространственных характеристик зоны генерации HF-НХЛ (а-з) и распределений интенсивности излучения в направлении течения АС (д, е) при использовании плоскосферического резонатора и коэффициентах вторичного разбавления  $\psi_2 = 0$  (а, в, д) и 8.5 (б, з, е).

Результаты, отражающие временную динамику пространственных характеристик генерационной зоны в плоскосферическом резонаторе, приведены на рис.3. Величина «отрыва» начала зоны генерации от среза СБ практически одинакова для обоих режимов работы лазера (рис.3,а,б). Протяженность же активной зоны  $\Delta x_L$  при  $\psi_2 = 8.5$  (как и в случае плоскопараллельного резонатора) достигает 11 см (рис.3,з). Неравномерность распределения интенсивности излучения на выходном зеркале плоскосферического резонатора по длине активной зоны (рис.3,д,е) несколько меньше, чем при использовании плоскопараллельного резонатора. Данное обстоятельство связано с тем, что в плоскосферическом резонаторе имеет место обращение (поворот) поля излучения относительно его оптической оси, что и приводит к некоторому выравниванию распределения интенсивности. Тем не менее из рис.3,д,е следует, что при наличии вторичного разбавителя максимум распределения интенсив-

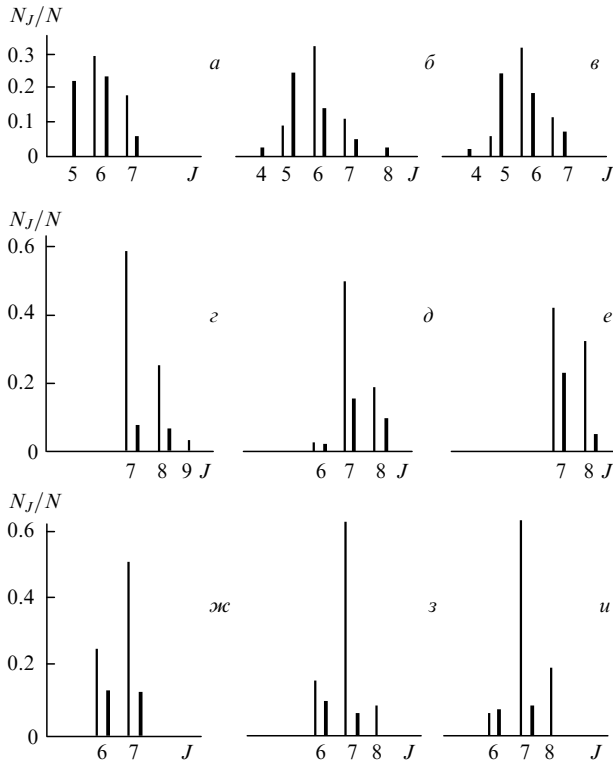


Рис.4. Спектры генерации HF-НХЛ со щелевым резонатором, измеренные на расстоянии  $x = 2.5$  (а–в), 8.5 (з–е) и 10.5 см (ж–и) от среза соплового блока при коэффициентах вторичного разбавления  $\psi_2 = 0$  (а, з, ж), 5 (б, д, з) и 8.5 (в, е, и).

ности излучения смещается вниз по потоку и в какой-то мере воспроизводится картина, характерная для плоскопараллельного резонатора (рис.2,д,е).

### 3.3. Спектральные характеристики лазерного излучения

Спектры генерации (относительные мощности линий излучения  $N_J/N$ , пропорциональные их интенсивностям), приведенные на рис.4, получены для полос 1–0 (тонкие линии) и 2–1 (толстые линии). На начальном участке АС (рис.4,а–в) при использовании только первого по потоку щелевого резонатора (рис.1; затвор б перекрывает второй резонатор) спектры демонстрируют перераспределение мощностей излучения между отдельными линиями и их смещение в коротковолновую область: при вторичном разбавлении (рис.4,б,в) появляются линии  $P_0(5)$  и  $P_1(4)$ , а максимальной интенсивностью отличаются линии  $P_0(6)$  и  $P_1(5)$  (индексы в символах переходов относятся к нижнему квантовому состоянию молекулы HF( $\nu$ )). Этот факт свидетельствует о снижении поступательной температуры АС. Относительная интенсивность спектральных линий не превышает 32%.

По мере продвижения в более удаленные от среза СБ области АС (для этого использовался только второй по потоку резонатор (рис.1); затвор б перекрывает первый резонатор) характер спектров резко меняется (рис.4,з–и). Во-первых, спектральные линии смещаются в длинноволновую область. Во-вторых, число линий в каждой колебательной полосе уменьшается. В-третьих, энергия излучения существенно перераспределяется между вращательными переходами в пользу линии  $P_0(7)$  с  $\lambda = 2.744$  мкм, в которой сосредоточено до 60% энергии. Вторич-

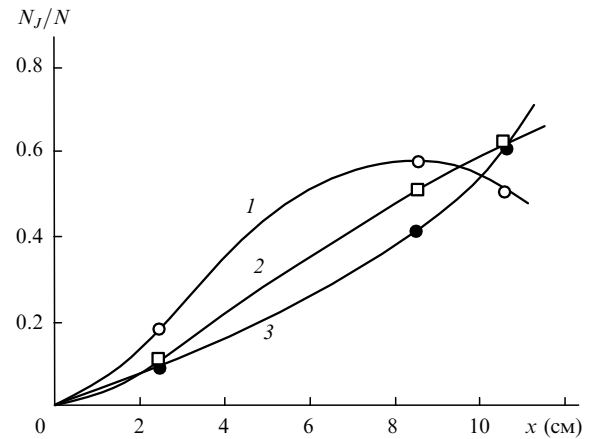


Рис.5. Продольные распределения параметра  $N_J/N$  для спектральной линии  $P_0(7)$  при  $\psi_2 = 0$  (1), 5 (2) и 8.5 (3).

ное разбавление слабо влияет на характер спектров, незначительно снижая (рис.4,з–е) или повышая (рис.4,ж–и) интенсивность линии  $P_0(7)$ .

Этот результат весьма интересен. Он указывает на возможность селекции спектральных линий в HF-НХЛ с трехструйным СБ при варьировании положения оптической оси резонатора и степени вторичного разбавления АС гелием (пропускание выходного зеркала фиксировано). В настоящем исследовании спектры генерации из областей АС, удаленных от среза СБ на расстояние более 8 см, были сняты впервые. Как видно из рис.5, при отсутствии вторичного разбавления максимум продольного распределения параметра  $N_J/N$  для спектральной линии  $P_0(7)$  лежит в области, удаленной от среза СБ на расстояние 7–9 см (кривая 1). На больших расстояниях из-за роста поступательной температуры интенсивность линии  $P_0(7)$  резко падает.

При наличии вторичного разбавления интенсивность линии продолжает расти и в более отдаленных областях АС, причем чем выше коэффициент  $\psi_2$ , тем больше темп роста интенсивности (кривые 2 и 3). По-видимому, в этом случае негативное влияние роста поступательной температуры компенсируется вторичным разбавлением АС гелием. Следует обратить внимание еще на одно обстоятельство. Спектры, представленные на рис.4, получены при различных коэффициентах  $\alpha_1$  ( $\alpha_1 \sim 1.7$  для рис.4,е и  $\alpha_1 < 1.6$  для рис.4,и), вследствие чего мощность излучения, выведенного из второго по потоку щелевого резонатора, отличается от мощности излучения, выведенного из первого резонатора. Тем не менее суммарная энергия линий  $P_0(7)$  и  $P_0(8)$  достигает 80% от общей энергии излучения.

Что касается временной стабильности спектров, то в течение, по крайней мере, первых семи секунд работы лазера и набор спектральных линий, и соотношение их интенсивностей почти не изменяются. Затем число линий уменьшается, а энергия излучения перераспределяется в длинноволновую область спектра. Одним из возможных объяснений этого эффекта может быть рост давления в камере низкого давления и, соответственно, в АС (в данном случае от 2.5 до 4 Тор). Поскольку связь спектрального состава лазерного излучения с газодинамическими параметрами АС и положением оптической оси резонатора еще недостаточно изучена, то эти вопросы требуют дальнейшего исследования.

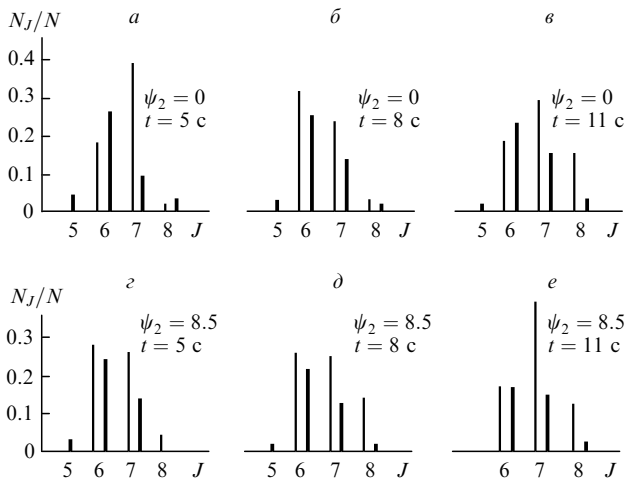


Рис.6. Спектры генерации HF-НХЛ с плоскосферическим резонатором, измеренные при различных коэффициентах вторичного разбавления  $\psi_2$  в разные моменты времени  $t$ .

Спектры генерации при работе HF-НХЛ с плоскосферическим резонатором (рис.6) получены при двух коэффициентах вторичного разбавления  $\psi_2 = 0$  и 8.5, причем для каждого из них оптическая ось резонатора находилась на оптимальном расстоянии от среза СБ:  $x_{\text{опт}} = 4.5$  см для  $\psi_2 = 0$  и  $x_{\text{опт}} = 6$  см для  $\psi_2 = 8.5$ . В отсутствие вторичного разбавления (рис.6,а–в) спектр более стабилен во времени как по набору генерируемых линий, так и по их интенсивности. В условиях вторичного разбавления (рис.6,г–е) спектр менее стабилен, причем (так же, как и в случае щелевого резонатора) по истечении семи-восьми секунд работы лазера число линий уменьшается, а мощность излучения перераспределяется в длинноволновую область спектра – в данном случае в линию  $P_0(7)$ . Причина этого эффекта пояснена выше. Интересно отметить, что интенсивности линии  $P_0(7)$  на рис.6,а,г в точности согласуются с распределениями, полученными при сканировании активной зоны щелевым резонатором (рис.5, кривые 1 и 3).

#### 4. Заключение

Исследование динамики пространственно-энергетических и спектральных характеристик излучения, генерируемого киловаттным HF-НХЛ с трехструйным СБ, собранным по схеме сопло–сопло–сопло, дало следующие результаты:

– при использовании двухапертурного щелевого резонатора получено распределение интенсивности излучения, подтверждающее более ранние результаты; показана возможность селекции спектральных линий при варьировании положения оптической оси резонатора и коэффициента вторичного разбавления АС гелием, в результате чего удалось сосредоточить до 60 % мощности излучения в линии  $P_0(7)$  с  $\lambda = 2.744$  мкм;

– при использовании плоскопараллельного и плоскосферического резонаторов установлено, что величина «отрыва» начала зоны генерации от среза СБ данной конструкции не зависит от степени вторичного разбавления АС гелием; протяженность зоны генерации достигает 10–12 см; распределение энергетических характеристик излучения лазера нестабильно во времени и зависит от конфигурации резонатора (в плоскопараллельном резонаторе картины распределения несимметричны по отношению к оси юстировки, а в плоскосферическом резонаторе характер распределения интенсивности излучения отражает факт обращения поля излучения относительно его оптической оси, которая является осью симметрии).

Авторы выражают благодарность В.К.Ребонэ за помощь в постановке экспериментов, П.Г.Ляшедько и В.Е.Дорошкевичу за участие в проведении измерений.

1. Ротинян М.А., Стрелец М.Х., Федоров И.А., Шур М.Л. *Квантовая электроника*, **25**, 387 (1998).
2. Конкин С.В., Ребонэ В.К., Федоров И.А. и др. *Квантовая электроника*, **25**, 397 (1998).
3. Галаев И.И., Конкин С.В., Федоров И.А. и др. *ПТЭ*, № 1, 122 (1997).
4. Малакара Д. (ред.) *Оптический производственный контроль* (М., Машиностроение, 1985).