

Непрерывный химический DF-лазер, работающий на топливной композиции с использованием этилена

И.А.Федоров, С.В.Конкин, М.А.Ротинян, Н.Е.Третьяков, А.Л.Эцина

Экспериментально исследованы последствия замены первичного горючего – водорода этиленом в составе традиционной топливной композиции $F_2 - H_2 - He$ для DF-лазера. В ходе сравнительных испытаний лазера с разным первичным горючим оценена полнота сгорания топливных смесей и определены их оптимальные химические составы, при которых измерены энергетические и спектральные характеристики лазерного излучения. Показано, что использование C_2H_4 вместо H_2 обеспечивает рост удельного энергосъема лазера на 37% без изменения протяженности активной среды и генерацию излучения в спектральном диапазоне 3.75–4.18 мкм.

Ключевые слова: химический лазер, оптимизация параметров, активные среды.

1. Введение

Непрерывный химический DF-лазер известен достаточно давно [1]. Интерес к нему обусловлен, прежде всего, хорошим прохождением его излучения ($\lambda \sim 3.8$ мкм) через атмосферу на приземных горизонтальных и вертикальных трассах [2]. Именно это обстоятельство является решающим при создании на основе DF-лазера мощных локационных и других систем наземного базирования [3].

При разработке подобных систем большое значение приобретает проблема выбора топливной композиции для генератора атомарного фтора, которая должна обеспечить сочетание высоких энергетических характеристик лазера с комплексом приемлемых эксплуатационных свойств компонентов топлива. В существующих за рубежом системах на основе DF-лазера используется топливо $NF_3 - C_2H_4 - He$, компонентами которого являются трифторид азота (NF_3), этилен (C_2H_4) и гелий (He). Это может свидетельствовать о том, что данное топливо в наиболее полной мере удовлетворяет предъявляемым требованиям. Однако мотивированное обоснование применения именно такого топлива в литературе отсутствует.

Отечественные экспериментальные исследования в области DF-лазеров проводились только на традиционном (базовом) топливе $F_2 - H_2 - He$ и были весьма ограниченными из-за чрезвычайно высокой стоимости дейтерия (D_2), который выполняет роль вторичного горючего с относительно высоким массовым расходом. Имеется опыт работы только с трифторидом азота, используемым в качестве фторсодержащего соединения при испытаниях HF-лазеров на топливной смеси $NF_3 - D_2 - He$.

И.А.Федоров, С.В.Конкин, М.А.Ротинян, Н.Е.Третьяков, А.Л.Эцина. ФГУП "Российский научный центр «Прикладная химия», Россия, 197198 С.-Петербург, просп. Добролюбова, 14

Поступила в редакцию 19 марта 2003 г., после доработки – 6 июня 2003 г.

Настоящая работа посвящена экспериментальной оценке последствий замены первичного горючего – водорода (H_2) этиленом в составе традиционной топливной композиции DF-лазера $F_2 - H_2 - He$. Необходимость постановки такой задачи обусловлена потенциальными эксплуатационными и энергетическими преимуществами использования этилена, что дает надежду на повышение эффективности работы DF-лазера.

Эксплуатационные преимущества этилена можно оценить при сопоставлении его наиболее важных свойств со свойствами водорода. Так, физические свойства этилена обеспечивают возможность его хранения в жидком состоянии при нормальной температуре и давлении ~ 5 МПа, что очень важно с точки зрения уменьшения габаритов лазерной установки. По своим химическим свойствам этилен является экологически безопасным, поскольку вероятность взрыва его смеси с воздухом значительно меньше, чем смеси водорода с воздухом. По биологическому воздействию на организм этилен относится к третьему (не самому высокому) классу опасности. Что же касается стоимости, то здесь преимущество этилена незначительно.

Главной целью нашего исследования являлась экспериментальная оценка энергетических преимуществ DF-лазера, работающего при использовании этилена.

2. Постановка экспериментов и условия их проведения

В качестве объекта исследования использовалась модель сверхзвукового DF-лазера автономного типа, рассчитанная на генерацию излучения мощностью ~ 5 кВт. Лазер был оснащен сопловым блоком с размером выходного сечения 25×2.8 см. Сопла для подачи окислительного газа (содержащего атомы F) и вторичного горючего (молекул D_2) размещены с шагом 7.5 мм. В качестве рабочих применялись следующие реагенты: газообразные фтор (окислитель), водород и этилен (первичное горючее), дейтерий (вторичное горючее) и гелий (разбавитель). Лазер размещался в барокамере (камере низкого давления), которая предназначена для отделения от ок-

ружающей среды газового потока, истекающего из соплового блока в режиме свободной струи.

В процессе исследования измерялись энергетические и спектральные характеристики лазерного излучения, а также регистрировалась общая картина течения активной среды по ее собственному свечению в видимом диапазоне спектра.

Определение мощности лазерного излучения осуществлялось методом двойного щелевого резонатора [4]. Система измерения мощности состояла из двух независимых резонаторов закрытого типа, оптические оси которых смещены относительно друг друга на $\Delta x = x_2 - x_1$ в направлении течения активной среды (x_1 и x_2 – расстояния от среза соплового блока до оптической оси соответствующего резонатора). Апертура каждого резонатора имела форму прямоугольника высотой 9 см и шириной d_1 или d_2 . Глухие неохлаждаемые сферические зеркала с радиусом кривизны 5 м были изготовлены из полированной меди. Каждое зеркало снабжено четырьмя термопарами хромель – копель. Длина резонаторов вдоль оптической оси составляла 1 м. В качестве выходного окна барокамеры применялась пластина из фтористого кальция диаметром 16 см.

Лазерная мощность определялась по приращению температуры в каждом из зеркал за время генерации, которое задавалось с помощью механического затвора, размещенного между активной средой и зеркалами. Излучение, выведенное через отверстие диаметром 2 мм в зеркале первого по потоку резонатора, направлялось в малоинерционный пироэлектрический приемник типа МГ-30, сигнал с которого регистрировался на светолучевом осциллографе Н-117 и служил для определения времени генерации. В экспериментах использовались резонаторы со следующими геометрическими характеристиками: $x_1 = 2$ см, $x_2 = 5.5$ см, $\Delta x = 3.5$ см, $d_1 = 4$ см, $d_2 = 3$ см. Мощность N излучения, генерируемого лазером, определялась как сумма мощностей N_1 и N_2 , генерируемых каждым резонатором. Погрешность измерения мощности описанным методом не превышает $\pm 7\%$.

Спектральный состав лазерного излучения определялся с помощью ИК спектрометра на базе монохроматора типа ИКМ-1, в котором штатный диспергирующий элемент (призма из хлористого натрия) заменен дифракционной решеткой. В качестве фотоприемника использовалось фотоспротивление ФСГ-22-3А2 на основе двойного соединения германия с золотом, диапазон чувствительности которого лежит в области $\lambda = 1.8 - 8.5$ мкм. Погрешность измерения таким способом относительных интенсивностей спектральных линий не превышает $\pm 5\%$. Отбор излучения для измерения спектра осуществлялся через отверстие в зеркале первого по потоку резонатора.

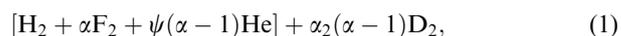
Общая картина течения активной среды регистрировалась по ее собственному свечению в видимом диапазоне спектра видеокамерой Sony с частотой съемки 24 кадра в секунду через смотровое окно в барокамере.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Как отмечалось во Введении, главная цель настоящей работы заключалась в экспериментальной оценке последствий замены первичного горючего – водорода в составе базовой топливной композиции DF-лазера эти-

леном. Такого рода оценку удобно проводить методом сопоставления характеристик лазера при его работе на каждом топливе. Очевидно, что для объективной оценки характеристик сопоставление следует проводить при химических составах топлива, обеспечивающих максимальный для каждого из них энергетический параметр, в качестве которого обычно рассматривают удельный энергосъем N_{Σ}^{\max} (определенный в расчете на суммарный массовый расход всех реагентов).

В соответствии с таким подходом исследование выполнялось в три этапа. На первом оптимизировался химический состав при работе DF-лазера на базовом топливе с условной формулой



а на втором – при работе на топливе с условной формулой



где α – коэффициент избытка окислителя (число молей фтора, приходящихся на один моль первичного горючего – водорода или этилена); ψ – степень разбавления топливной смеси (число молей разбавителя – гелия, приходящихся на один моль свободного условно молекулярного фтора в составе продуктов сгорания); α_2 – коэффициент избытка вторичного горючего (число молей вторичного горючего – дейтерия, приходящихся на один моль свободного условно молекулярного фтора). Формула (1) является общепринятой, а формула (2) записана по аналогии с (1), что облегчает сопоставление результатов, полученных для разных топливных композиций. В процессе оптимизации определялись безразмерные коэффициенты α_{opt} и ψ_{opt} . Безразмерный коэффициент α_2 оставался фиксированным и равным ~ 10 при фиксированном давлении $p_c \sim 0.1$ МПа в камере сгорания генератора атомарного фтора.

На третьем этапе определялись энергетические, спектральные и пространственные характеристики излучения и активной среды лазера при его работе на каждом из сопоставляемых топлив при найденных оптимальных условиях. Полученные характеристики сравнивались между собой.

3.1. Оптимизация химического состава топливных смесей

Результаты оптимизации, выполненной в соответствии с методикой работы [5], приведены на рис.1. Первые две зависимости (рис.1,а, б) представляют собой функции $N_{\Sigma} = f(\beta)$, построенные при коэффициенте $\alpha = \text{const}$, значения которого приняты по результатам расчетов близкими к оптимальным для каждого топлива (коэффициент разбавления топливной смеси в генераторе атомарного фтора β – это число молей гелия, приходящихся на один моль первичного горючего [5]). С учетом формул (1) и (2) для варианта работы лазера с использованием водорода $\beta = \psi(\alpha - 1)$, а для варианта работы с использованием этилена $\beta = 6\psi(\alpha - 1)$.

Две другие зависимости (рис.1,в, г) представляют собой функции $N_{\Sigma} = f(\alpha)$, построенные при коэффициенте $\beta_{\text{opt}} = \text{const}$, значения которого получены из первых двух зависимостей (рис.1,а, б). Обработка всех этих зависимостей позволила определить оптимальные химические составы топлив, характеризуемые безразмерными коэф-

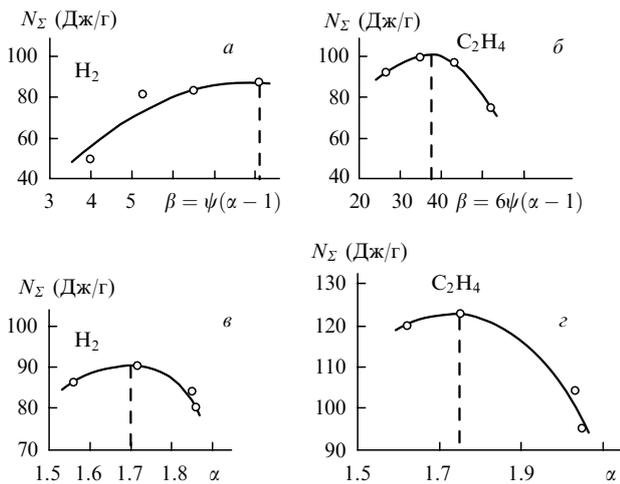


Рис.1. Зависимости удельного энергосъема от коэффициентов разбавления β (а, б) и коэффициента избытка окислителя α (в, г) при работе DF-лазера с использованием водорода и этилена.

фициентами α_{opt} и ψ_{opt} . Последние находят из следующих соотношений: $\psi_{opt} = \beta_{opt}/(\alpha_{opt} - 1)$ – для варианта работы лазера с использованием водорода, $\psi_{opt} = \beta_{opt}/6(\alpha_{opt} - 1)$ – для варианта работы с использованием этилена. При найденных оптимальных химических составах топлив выполнены контрольные эксперименты с использованием водорода и этилена. Полученные данные приведены в табл.1.

Полнота сгорания разных топлив в одной и той же камере сгорания оценивалась нами общепринятым методом – с помощью коэффициента «полноты давления» $\varphi_{pc} = \mu\varphi_{\beta}$ [6], где μ – коэффициент расхода смеси; $\varphi_{\beta} = \beta_{exp}/\beta_{theor}$; β_{exp} и β_{theor} – экспериментальный и теоретический импульсы давления в камере сгорания. Оказалось, что полнота сгорания разных топлив в камере длиной 23 см практически одинакова и характеризуется коэффициентом $\varphi_{pc} = 0.83 - 0.85$.

3.2. Оценка эффективности использования этилена

Определенные при найденных оптимальных химических составах топлива выходные (энергетические, спектральные и пространственные) характеристики DF-лазера сопоставлялись между собой, что позволило оценить эффективность использования этилена.

Влияние химического состава топлива на выходные характеристики DF-лазера определяется рядом факторов, к наиболее важным из которых относятся концентрации c_F и c_{HF} атомарного фтора и фтористого водорода в составе продуктов сгорания, их температура T_c и молекулярная масса m_c . Зависимости всех этих параметров от коэффициента избытка окислителя α при давлении в камере сгорания $p_c = 0.1$ МПа и степени разбавления ψ_{opt} , близкой к оптимальной для каждого топлива, показаны на рис.2. Приведенные данные позволяют понять, почему с точки зрения энергетики топливная композиция $C_2H_4 - F_2 - He$ имеет преимущество перед базовой для DF-лазера композицией $H_2 - F_2 - He$ (см. табл.1).

Табл.1. Оптимальный химический состав топлив и энергетические характеристики DF-лазера.

Топливо в генераторе атомарного фтора	α_{opt}	ψ_{opt}	N_{Σ}^{max} (Дж/г)	N_F^{max} (Дж/г)	N^{max} (кВт)
$H_2 + \alpha F_2 + \psi(\alpha - 1)He$	1.70	12.0	87	403	3.04
$C_2H_4 + 6\alpha F_2 + 6\psi(\alpha - 1)He$	1.75	8.3	119	505	3.97

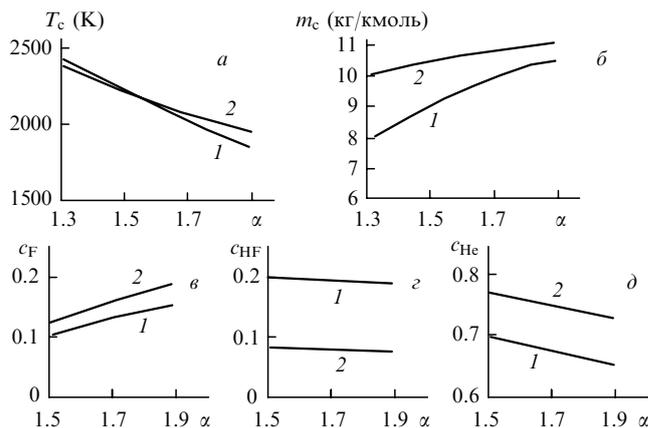


Рис.2. Зависимости равновесной температуры (а), молекулярной массы продуктов сгорания (б) и равновесных концентраций атомарного фтора (в), фтористого водорода (з) и инертного разбавителя – гелия (д) от коэффициента избытка окислителя α при работе DF-лазера с использованием водорода (1) и этилена (2).

Видно, что использование C_2H_4 вместо H_2 сопровождается увеличением концентрации атомарного фтора в продуктах сгорания топлива оптимального состава на 20% (рис.2,в). Поскольку концентрация атомарного фтора на срезе окислительных сопел с высокой точностью совпадает с ее значением в генераторе атомарного фтора (т.к. согласно расчетам [7] течение в соплах является практически «замороженным» во всех рассмотренных диапазонах изменения коэффициентов α и ψ), то это приводит к увеличению числа активных центров, инициирующих реакции накачки, и к наработке дополнительного числа рабочих молекул DF(ν) (ν – колебательное квантовое число). Происходящее при этом одновременное снижение в 2.5 раза концентрации молекул $HF(0)$, являющихся наиболее сильными дезактиваторами рабочих молекул (рис.2,з), в конечном итоге и обеспечивает рост выходной мощности лазера N на 30%, удельного энергосъема N_{Σ} – на 37% и удельной мощности в расчете на массовый расход свободного фтора N_F – на 25% (см. табл.1).

В свете полученных экспериментальных результатов становятся понятными причины, по которым для всех существующих за рубежом систем наземного базирования на основе DF-лазеров выбрана топливная композиция $C_2H_4 - NF_3 - He$. Трифторид азота – менее эффективный окислитель, чем молекулярный фтор. Выполненные нами ранее экспериментальные исследования последствий замены молекулярного фтора трифторидом азота продемонстрировали снижение удельного энергосъема непрерывного химического лазера на 35% [8]. Рост выходной мощности при замене водорода этиленом на 37% позволяет это снижение полностью компенсировать. Следовательно, удельный энергосъем DF-лазера, работающего на топливе $C_2H_4 - NF_3 - He$, по- существу, эквивалентен удельному энергосъему при его работе на традиционном топливе $H_2 - F_2 - He$. С учетом же подходящих эксплуатационных свойств трифторида азота и этилена (по сравнению со фтором и водородом) преимущество топливной композиции $C_2H_4 - NF_3 - He$ становится очевидным.

Спектральные распределения мощности излучения DF-лазера (относительные мощности линий излучения N_j/N , пропорциональные их интенсивностям) показаны на рис.3. Они включают от восемнадцати (рис.3,а) до

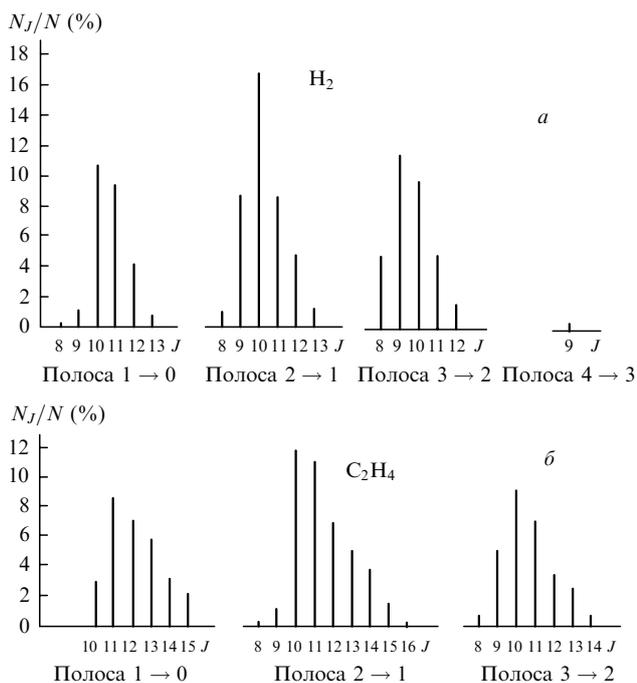


Рис.3. Спектры генерации DF-лазера, работающего с использованием водорода и этилена.

двадцати двух (рис.3,б) линий: $P_0(8) - P_0(15)$ в полосе 1 \rightarrow 0, $P_1(8) - P_1(16)$ в полосе 2 \rightarrow 1 и $P_2(8) - P_2(14)$ в полосе 3 \rightarrow 2 в диапазоне $\lambda = 3.679 - 4.179$ мкм. Характерной чертой спектра излучения лазера, работающего с использованием водорода (рис.3,а), является наличие в колебательной полосе 2 \rightarrow 1 вращательной линии $P_1(10)$ с $\lambda = 3.876$ мкм, относительная интенсивность которой превышает относительные интенсивности всех остальных линий почти вдвое. При переходе к этилену резкие различия интенсивностей линий сглаживаются (рис.3,б). Это вызвано появлением дополнительных переходов, вследствие чего энергия излучения перераспределяется по большему числу состояний. При этом спектральное распределение мощности смещается в сторону больших вращательных квантовых чисел J . Смещение сопровождается исчезновением линий $P_0(8) - P_0(9)$ и появлением линий $P_0(14) - P_0(15)$, $P_1(14) - P_1(16)$ и $P_2(13) - P_2(14)$. Объяснение данного факта может быть дано на основе анализа термодинамических параметров и химического состава продуктов сгорания.

Из рис.2,а следует, что температуры продуктов сгорания топлива обоих типов одинаковы, поэтому при их истечении из сопел одной и той же конфигурации на выходе последних температуры также будут близки. Концентрация же атомов фтора при работе лазера с использованием этилена на 20 % выше, чем при использовании водорода (рис.2,в), а концентрации инертного разбавителя – гелия различаются в этих случаях не более чем на 10 % (рис.2,д). Поэтому температура активной среды несколько возрастает ввиду роста тепловыделения химической реакции накачки $F + D_2 \rightarrow DF(v) + D$. Это способствует созданию условий для заселения более высоких вращательных уровней рабочих молекул и в конечном итоге приводит к смещению спектра в длинноволновую область. Распределение спектральной мощности по полосам характеризуется практически постоянным соотношением долей мощности лазерного излуче-

ния, заключенной в каждой из них: 26 % в полосе 1 \rightarrow 0, 43 % в полосе 2 \rightarrow 1 и 31 % в полосе 3 \rightarrow 2.

Протяженность активной среды оценивалась по распределению мощности лазерного излучения на зеркалах резонатора и по результатам видеосъемки потока. Так, в оптимальном режиме работы лазера на каждом горючем на зеркала первого по потоку резонатора приходится 79 % и 77 %, а на зеркала второго – 21 % и 23 % полной мощности излучения при использовании водорода и этилена соответственно. Это может свидетельствовать о примерно одинаковой протяженности активных сред, что подтверждают и результаты видеосъемки. Известно [9], что протяженность активной среды определяется главным образом двумя параметрами: релаксационными потерями (зависящими от химического состава продуктов сгорания) и скоростью течения потока (зависящей от молекулярной массы продуктов сгорания и их температуры). При работе лазера с использованием этилена релаксационные потери меньше, но выше молекулярная масса продуктов сгорания (по сравнению с вариантом работы с использованием водорода). Взаимная компенсация этих параметров с учетом близких температур продуктов сгорания, по-видимому, и способствует формированию активных сред примерно одинаковой протяженности. К сожалению, с помощью имеющейся информации определить эту протяженность довольно затруднительно. Ранее полученные данные при работе исследуемой модели в режиме HF-лазера на топливе $F_2 - D_2 - He$ показали, что она не превышает 7 см.

С большей определенностью можно оценить влияние степени разбавления ψ продуктов сгорания топлива $C_2H_4 - F_2 - He$ гелием на структуру потока в полости резонатора. Видеосъемка показала, что по мере увеличения коэффициента ψ от 4 до 8 изменяется режим истечения газа из окислительного сопла. При $\psi = 4$ сопла функционируют в режиме неполного расширения (рис.4,а), а при больших ψ – в режиме, близком к расчетному (рис.4,б). При этом протяженность светящегося бледно-голубым светом фронта в направлении течения потока увеличивается, что может свидетельствовать и об увеличе-

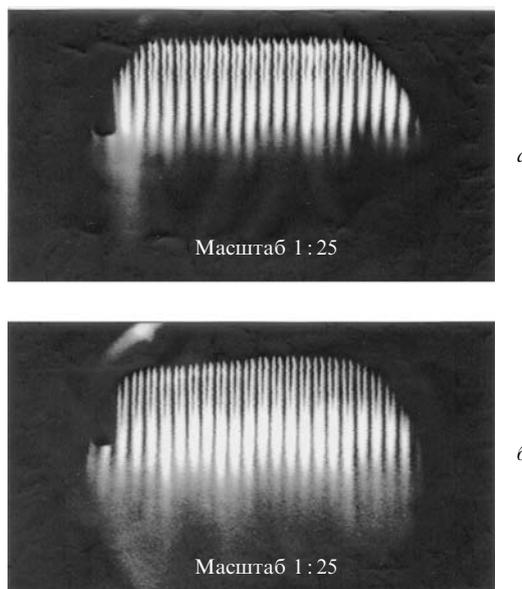


Рис.4. Видеокadres течения потока активной среды DF-лазера, работающего с использованием этилена при степени разбавления топливной смеси гелием $\psi = 4$ (а) и 8 (б).

нии протяженности активной среды. Наиболее отчетливо влияние разбавления сказывается на смещении струй окислительного газа и вторичного горючего. При смешении за счет ламинарной диффузии излучение DF-лазера наблюдается только в сравнительно узком слое, который начинается в выходном сечении соплового блока в месте контакта струй окислительного газа и вторичного горючего. Эта зона реакции постепенно проникает в струю окислительного газа и достигает ее оси в сечении, расположенном на расстоянии L_{mix} ниже по потоку. Величину L_{mix} называют условной длиной смещения – это расстояние от среза соплового блока вдоль оси сопла окислительного газа, в конце которого возникает излучение на оси потока [10]. На видеокдрах (рис.4) видно, что по мере увеличения степени разбавления ψ величина L_{mix} (длина темной «треугольной» области на фоне светлой струи окислительного газа) растет. Причиной этого является блокирующее влияние гелия на взаимную диффузию атомов фтора и молекул дейтерия.

4. Заключение

Таким образом, экспериментальное исследование непрерывного химического DF-лазера показало, что при

замене водорода этиленом, используемым в качестве первичного горючего в генераторе атомарного фтора, удастся обеспечить более эффективную работу лазера и улучшить условия эксплуатации лазерной установки.

Авторы выражают благодарность Ю.Л.Самотоеву за помощь в проведении экспериментов и Б.А.Виноградову за проведение видеосъемки процесса.

1. Wilson L.E., Hook D.L. *AIAA Paper*, № 344 (1976).
2. Gebhardt F.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2502**, 101 (1998).
3. Miller J. *Proc. II Intern. Laser Sci. Conf.* (Seattle, USA, 1986, p. 10).
4. Галаев И.И., Конкин С.В., Ребонэ В.К., Федоров И.А. *ПТЭ*, № 1, 122 (1997).
5. Ребонэ В.К., Ротинян М.А., Федоров И.А. *Квантовая электроника*, **23**, 707 (1996).
6. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. *Теория ракетных двигателей* (М.: Машиностроение, 1980).
7. Бассина И.А., Дорот В.Л., Стрелец М.Х. *Изв. АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа*, № 3, 120 (1979).
8. Федоров И.А. *Непрерывные химические лазеры на рабочих молекулах фтористого водорода и фтористого дейтерия. Кн.1* (С.-Петербург: изд-во Балт. гос. техн. ун-та, 1994).
9. *Химические лазеры*. Под ред. Н.Г.Басова (М.: Наука, 1982).
10. Дрисколл Р.Дж., Тригей Дж.У. *Аэрокосмическая техника*, **1**, 80 (1983).