

Тетрафторэтилен как компонент топлива для генератора атомарного фтора сверхзвукового непрерывного химического HF-лазера

И.А.Фёдоров

В качестве альтернативного компонента топлива для генератора атомарного фтора сверхзвукового непрерывного химического HF-лазера автономного типа предлагается дешевое и широкодоступное соединение – один из ненасыщенных перфторуглеродов – тетрафторэтилен C_2F_4 . Продукты сгорания гипергольной топливной смеси $F_2-C_2F_4-He$ не содержат активных релаксантов колебательно-возбуждённых молекул $HF(v)$. Согласно оценкам, выход атомарного фтора в сопоставимых условиях составляет около 70% по отношению к выходу в генераторе атомарного фтора, работающем на «базовой» для HF-лазера смеси F_2-D_2-He , а удельный энергоёмкость снижается на 23% при улучшении комплекса эксплуатационных свойств топлива и существенном удешевлении стоимости пуска лазера при проведении его стендовых испытаний.

Ключевые слова: сверхзвуковой непрерывный химический HF-лазер, генератор атомарного фтора, тетрафторэтилен.

1. Введение

Уникальные достоинства сверхзвуковых непрерывных химических HF/DF-лазеров (HF/DF-НХЛ) – высокий энергетический потенциал и отсутствие необходимости во внешнем источнике энергии (возможность работы в автономном режиме) – способствуют активным поискам их практического применения в целом ряде новых технологий. Практическая реализация эффективного сверхзвукового HF/DF-НХЛ автономного типа требует оптимизации в рамках двух проблем, связанных с выбором топлива для генератора атомарного фтора. Первая проблема предполагает поиск, оценку и выбор компонентов топлива на основе требований, предъявляемых к ним как к источникам химической энергии, с одной стороны, и как к веществам, находящимся в эксплуатации вне лазера, – с другой. Вторая проблема состоит в определении оптимального химического состава топлива, который приводит к достижению максимальной энергетики лазера.

Оптимизация в рамках этих проблем затруднена противоречивой ситуацией, согласно которой компоненты, технологически более подходящие, могут оказаться лучше, чем компоненты, менее подходящие, но имеющие более высокие энергетические параметры. Таким образом, исходя из условий эксплуатации, на тот или иной компонент топлива может быть наложен запрет. Именно по этой причине поиск новых компонентов направлен на выявление и изучение соединений, пригодных для использования в качестве фторсодержащих окислителей и первичных горючих с целью замены «базовой» топливной смеси $F_2-D_2(H_2)-He$, отличающейся не вполне удовлетворительными характеристиками с точки зрения ток-

сичности, пожаро- и взрывоопасности, возможности хранения и стоимости пуска лазера.

В области разработки HF-НХЛ исследования по улучшению эксплуатационных характеристик топлив для генератора атомарного фтора ведутся в двух направлениях: по пути подбора малотоксичных фторсодержащих соединений для замены фтора как окислителя и по пути подбора относительно дешевых высокоэнергетических безводородных горючих для замены дейтерия как первичного горючего.

Что касается фторсодержащего окислителя, то в результате большого числа расчётных [1] и экспериментальных [2–4] исследований HF/DF-лазеров наиболее эффективным соединением по критерию «энергетика – технологичность» признан трифторид азота NF_3 .

Круг соединений, пригодных для использования в качестве первичных горючих, достаточно широк. Его можно разделить на две группы: водородсодержащие соединения и их дейтериевые аналоги, а также соединения, не содержащие водород. При этом, если в DF-лазере допускается использование горючих обеих групп, то в HF-лазере возможно применение только безводородных горючих. Использование в DF-лазере значительно более широкого набора первичных горючих за счёт возможности применения водородсодержащих соединений, например этилена C_2H_4 , позволяет подобрать горючее, образующее минимальное количество релаксантов колебательно-возбуждённых молекул $DF(v)$ – «холодных» молекул $HF(0)$. Установлено [5], что переход на первичное горючее – этилен – вместо водорода обеспечивает рост удельного энергоёмкости на 30%–40%. Компенсация снижения удельного энергоёмкости при замене F_2 на NF_3 (также на 30%–40%) его увеличением при замене H_2 на C_2H_4 приводит к топливной композиции $NF_3-C_2H_4-He$, энергетические характеристики которой фактически эквивалентны характеристикам «базового» для DF-лазера топлива F_2-H_2-He . Именно этим обстоятельством и обусловлено применение композиции $NF_3-C_2H_4-He$ во всех

И.А.Фёдоров. ФГУП «РНИИ "Прикладная химия"», Россия, 193232 С.-Петербург, ул. Крыленко, 26А; e-mail: appolo.47@mail.ru

Поступила в редакцию 20 февраля 2019 г., после доработки – 15 апреля 2019 г.

современных разработках лазерных систем большой мощности на основе DF-НХЛ [6], что дает основание говорить о появлении нового «базового» топлива.

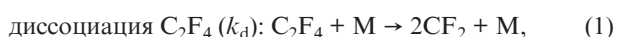
Таким образом, если для DF-лазера проблему поиска эффективной топливной композиции для генератора атомарного фтора в первом приближении можно считать решенной, то для HF-лазера она остается открытой, главным образом по причине отсутствия первичного горючего, которое в наиболее полной степени удовлетворяет критерию «энергетика–технологичность». В этом отношении неплохую перспективу имеют ненасыщенные перфторуглероды, в частности тетрафторэтилен C_2F_4 .

Цель настоящей поисковой работы заключалась в предварительной оценке перспективности использования тетрафторэтилена в качестве первичного горючего для HF-НХЛ для обоснования целесообразности проведения дальнейших детальных исследований характеристик лазерного излучения (энергетических, усилительных, спектральных) и активной среды (пространственных и газодинамических). Необходимость постановки такой задачи обусловлена двумя причинами. Во-первых, необычайно высокой стоимостью дейтерия, который используется как первичное горючее при стендовых испытаниях HF-лазеров. На мировом рынке она составляет около 5000 \$ за один килограмм, а на отечественном – около 2500 \$. Во-вторых, отсутствием детальных исследований перфторуглеродов как компонентов топлива лазеров этого типа.

2. Tetрафторэтилен как химический компонент

Tetraфторэтилен C_2F_4 привлекателен в связи с его коммерческой доступностью (коммерческое обозначение хладон-114), низкой стоимостью (тетрафторэтилен производства ОАО «Кирово-Чепецкий химический комбинат» стоит около 5 \$ за один килограмм) и обширным накопленным опытом эксплуатации. Физико-химические свойства тетрафторэтилена достаточно полно приведены в справочнике [7]. Для оценки эксплуатационных характеристик существенно, что C_2F_4 при нормальных условиях является бесцветным и не имеющим запаха газом (критическая температура $T_{crit} = 306.45$ К, критическое давление $p_{crit} = 4$ МПа), в смеси с воздухом способным к воспламенению. Относится к веществам четвертого (самого низкого) класса опасности (его предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны составляет 20 мг/м³). Не обладает коррозионной активностью, поэтому при его эксплуатации допускается применение широкой номенклатуры металлических и неметаллических материалов (кроме фторопласта-4, способствующего полимеризации). Склонность к полимеризации (часто взрывного характера) может быть устранена введением небольшой примеси стабилизаторов (третичные амины), практически не влияющих на физико-химические свойства мономера.

Детальный механизм реакции перфторуглеродов с фтором неизвестен. Имеются лишь разрозненные данные по константам скоростей k_i отдельных стадий реакции. Для простоты рассуждений можно предположить, что в стационарных условиях процесс горения C_2F_4 во фторе состоит из следующих элементарных стадий:



где M – произвольная частица топливной смеси в камере сгорания генератора атомарного фтора; k_d , k_1 , k_2 и k_D – константы скорости реакций (1)–(4).

Оценка характерных времён элементарных процессов (1)–(4) для температуры $T = 1500$ К и давления в камере сгорания $p = 0.1$ МПа приводит к следующим результатам. Константа скорости k_d в интервалах температуры $T = 1200$ – 1800 К и плотности $\rho = (0.9$ – $1.7) \times 10^{-5}$ моль/см³ даётся соотношением [8]: $k_d = 10^{15.89} T^{0.5} \exp(-55.69/RT)$, где R – газовая постоянная. При температуре $T = 1500$ К $k_d = 2.6 \times 10^9$ см³·моль⁻¹·с⁻¹, а характерное время диссоциации C_2F_4 есть $t_d = 20$ мкс.

Соотношения для констант $k_1 = 10^{11.30} T^{0.5} \exp(-2.12/RT)$ и $k_2 = 10^{11.34} T^{0.5} \exp(-2.895/RT)$ заимствованы из справочника [9]. При $T = 1500$ К и объёмном содержании F_2 в топливной смеси в количестве 20% характерные времена реакций (2) и (3) составляют $t_1 = 0.08$ мкс и $t_2 = 1$ мкс.

Диссоциация избытка F_2 по реакции (4) при температуре $T = 1500$ К в соответствии с константой $k_D = 10^{12.66} \times T^{0.5} \exp(-2.849/RT)$, рекомендованной для диапазона температур $T = 1000$ – 2000 К в [10], протекает с характерным временем $t_D = 170$ мкс.

Следовательно, как и в случае использования «базового» для HF-лазера топлива F_2 – D_2 – He , наиболее медленным процессом в стационарных условиях является установление диссоциационного равновесия в избыточном фторе.

Экспериментальным путём проверялась гипергольность (самовоспламеняемость) смеси F_2 – C_2F_4 . С этой целью в кварцевый реактор в виде трубки с внутренним диаметром 8 мм вдоль её оси подавался фтор, а через боковую стенку – тетрафторэтилен. Давление в реакторе поддерживалось на уровне $p = 0.1$ МПа. Температура в зоне реакции измерялась термопарой. При подаче в реактор реагентов с объёмным расходом 0.6–1 см³/с наблюдался рост температуры смеси до 523–573 К. Увеличение объёмного расхода до 1.4–2 см³/с приводило к появлению жёлтого пламени с одновременным ростом температуры до 673–723 К. Температурные и концентрационные пределы самовоспламенения не определялись.

3. Термодинамический расчёт продуктов сгорания

Расчёт характеристик равновесной среды в генераторе атомарного фтора, работающего на смеси F_2 – C_2F_4 – He , выполнен по упрощенной математической модели, аналогичной предложенной в [11] для генератора, работающего на «базовой» смеси F_2 – D_2 – He . В типичных условиях работы (давление и температура в камере сгорания $p_c = 0.1$ – 1.0 МПа и $T_c = 1550$ – 1880 К) процесс горения описывается следующим уравнением:

Табл.1. Результаты термодинамического расчёта химического состава и параметров продуктов сгорания сопоставляемых топлив в генераторе атомарного фтора.

Топливо ($T_c = 1480$ K)	m/F_{crit} (г·см ⁻² ·с ⁻¹)	Расход реагента (моль·см ⁻² ·с ⁻¹)							k	μ (г/моль)
		F ₂	C ₂ F ₄	D ₂	He	F	CF ₄	DF		
F ₂ -C ₂ F ₄ -He	7.45	0.092	0.025	–	0.37	0.080	0.050	–	1.40	14.87
F ₂ -D ₂ -He	6.90	0.116	–	0.060	0.45	1.116	–	0.120	1.56	10.10

Примечание: массовые расходы m/F_{crit} рассчитаны на 1 см² площади критического сечения соплового блока; F_{crit} – площадь критического сечения (см²); k – показатель адиабаты; m – массовый расход реагента (г/с); μ – молекулярная масса продуктов сгорания.

$$\alpha F_2 + C_2 F_4 + \gamma He = 2\alpha_{diss}(\alpha - 2)F + 2CF_4 + \gamma He + (1 - \alpha_{diss})(\alpha - 2) F_2, \quad (5)$$

где α – коэффициент избытка фтора; $\alpha_{diss} = p_F/(p_F + 2p_{F_2})$ – степень диссоциации молекулярного фтора; $\gamma = 2(p_{CF_4} + p_{He})/(p_F + 2p_{F_2})$ – коэффициент избытка гелия по отношению к количеству C₂F₄; p_i – парциальное давление i -го продукта сгорания; i – реагенты и продукты сгорания F, F₂, CF₄, He.

Содержание других фторуглеродов в равновесной смеси при указанных условиях пренебрежимо мало. Оценки химического состава (парциальных давлений p_i) и температуры T_c газовой среды в генераторе атомарного фтора в приближении равновесия получены стандартным термодинамическим расчётом для газодинамически запертого сопла с учётом тепловых потерь (по аналогии с [11]) при давлении $p_c = 0.1$ МПа. Одновременно вычислялись и другие параметры среды – удельные теплоёмкости, показатель адиабаты, молекулярная масса и др. Для степеней диссоциации молекулярного фтора $\alpha_{diss} = 0.95$ и разбавления гелием $\gamma = 10$ данные расчётов сведены в табл.1. Результаты вычислений позволили выполнить сравнение параметров альтернативного топлива F₂-C₂F₄-He и «базового» топлива F₂-D₂-He.

Термодинамический расчёт показал, что в сопоставимых условиях гипергольное топливо F₂-C₂F₄-He обеспечивает выход атомарного фтора на уровне 70% от значения, характерного для «базового» для HF-лазера топлива F₂-D₂-He, при необходимой степени разбавления топливной смеси гелием. В отличие от продуктов сгорания «базового» топлива, в составе которых имеются «холодные» молекулы DF(0) – активные релаксанты колебательно-возбуждённых молекул HF(ν), среди продуктов сгорания C₂F₄ с F₂ присутствует лишь минимальное количество малоактивных релаксантов – молекул CF₄ (константа релаксации молекул HF(ν) на молекулах CF₄ на два порядка меньше константы релаксации на «холодных» молекулах DF(0)).

4. Оценка энергетических характеристик

Чтобы принять обоснованное решение о замене компонентов топлива, необходимо оценить её влияние на энергетические характеристики HF-лазера, т.е. сопоставить альтернативное топливо с «базовым». Для объективной оценки сравнительной энергетической эффективности разных топлив для генератора атомарного фтора их сопоставление следует проводить при оптимальных химических составах, обеспечивающих максимальное для каждого топлива значение удельного энергосъёма $N_\Sigma = N/m_\Sigma$ (где N – мощность излучения лазера, m_Σ – суммарный массовый расход топливной смеси). Определение та-

ких составов связано с проведением значительного объёма сложных и трудоёмких численных расчётов или дорогостоящих экспериментов. В связи с этим целесообразно использовать другой подход, а именно экспресс-оценку по методике [12], разработанной на основе обобщения результатов численных исследований, которые были выполнены для большой группы топливных композиций в широком диапазоне изменения релаксационных характеристик продуктов сгорания.

В соответствии с этой методикой сравнительная энергетическая эффективность ε двух сопоставляемых топлив учитывает только изменение молекулярной массы продуктов сгорания μ , оказывающей влияние на скорость взаимной диффузии реагентов в лазерной камере, и различие их релаксационных свойств φ_{rel} в отношении колебательно-возбуждённых молекул HF(ν). Она определяется по формуле [12]

$$\varepsilon = \frac{N_{\Sigma_{max1}}}{N_{\Sigma_{max2}}} = \frac{\mu_2 \varphi_{rel1}}{\mu_1 \varphi_{rel2}}, \quad (6)$$

где $N_{\Sigma_{max1}}$ и $N_{\Sigma_{max2}}$ – удельные энергосъёмы лазера, работающего с использованием топлив 1 (альтернативное) и 2 («базовое») при оптимальных химических составах; μ_1 и μ_2 – молекулярные массы продуктов сгорания топлив 1 и 2; φ_{rel1} и φ_{rel2} – поправки, учитывающие релаксационные свойства продуктов сгорания топлив 1 и 2.

Оптимальный химический состав каждого из топлив, при котором следует проводить сопоставление их энергетических характеристик, определяется исходя из двух условий: оптимальное объёмное содержание атомарного фтора в продуктах сгорания $x_F^{opt} = 0.118$, а оптимальная адиабатическая температура продуктов сгорания $T_c^{opt} \geq 1500$ K (найдена предварительно для «базового» топлива, т.е. для топлива, с которым проводится сопоставление (в формуле (6) ему отвечает индекс «2»)).

Условная формула топлива записывается в виде

$$A + \alpha B + \psi C, \quad (7)$$

где A – горючее; B – окислитель; C – инертный разбавитель; α и ψ – числа молей окислителя и инертного разбавителя, приходящиеся на один моль горючего.

Для каждого из рассматриваемых топлив при выбранном давлении в камере сгорания генератора атомарного фтора проводится серия термодинамических расчётов, в ходе которых варьируются коэффициенты α и ψ . Полученные данные по химическому составу и температуре продуктов сгорания используются для определения величин α_{opt} и ψ_{opt} , удовлетворяющих двум отмеченным выше условиям. Величины поправок ψ_{rel} , учитывающих релаксационные свойства продуктов сгорания, определяют с помощью зависимостей потерь удельного энергосъёма,

обусловленных VT-релаксацией колебательно-возбуждённых молекул HF(v) на побочных продуктах сгорания, от релаксационного фактора k_{rel} [12]:

$$k_{rel} = \sum k_{VT}^i \psi_{F_2}^i, \quad (8)$$

где k_{VT}^i – константа скорости VT-релаксации излучающих молекул на i -м из продуктов сгорания; $\psi_{F_2}^i = x_i/0.5x_F$ – степень разбавления i -м продуктом сгорания в расчёте на один моль свободного условно молекулярного фтора; x_i , x_F – мольные доли i -го продукта сгорания и свободного фтора.

Эксплуатационная оценка S , отражающая комплекс свойств как исходных компонентов, так и топлива в целом, существенных с точки зрения эксплуатации лазера, определяется по широкому кругу показателей с использованием данных по физическим, химическим и токсикологическим свойствам реагентов в отдельности и топлива в целом с учётом его доступности (масштаба производства и стоимости). Способ определения S изложен в [12].

При проведении экспресс-оценки в качестве «базового» топлива принято топливо F_2-D_2-He . Условные формулы сопоставляемых топлив имеют следующий вид:

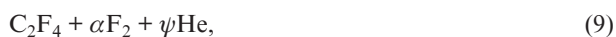


Табл.2. Результаты термодинамического расчёта параметров продуктов сгорания и поправок на релаксацию сопоставляемых топлив в генераторе атомарного фтора.

Топливо	x_F^{opt}	T_c^{opt} (К)	α_{opt}	ψ_{opt}	μ (г/моль)	ψ_{rel}
$F_2-C_2F_4-He$	0.118	1901	3.34	18.0	13.18	1.00
F_2-D_2-He	0.118	1900	2.50	11.9	9.00	0.89

Принятые условия проведения термодинамических расчётов таковы: $p_c = 0.1$ МПа; $T_c^{opt} = 1900$ К (при использовании распространённых на практике сопловых блоков с геометрической степенью расширения сопел 10–20 величина T_c^{opt} без проведения предварительных исследований может быть принята равной 1800–2000 К [11, 13]); $x_F^{opt} = 0.118$; $\alpha = 2.0-3.5$ и $\psi = 10-20$ (для топлива (9)); $\alpha = 1.5-2.5$ и $\psi = 3-15$ (для топлива (10)). Результаты расчётов помещены в табл.2.

С учётом соотношения (6) и данных табл.2 оценка сравнительной энергетической эффективности альтернативного топлива $F_2-C_2F_4-He$ определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{N_\Sigma}{N_{\Sigma base}} = \frac{9.00/13.18}{1.00/0.89} = 0.77. \quad (11)$$

Это значит, что замена дейтерия тетрафторэтиленом в составе «базовой» топливной композиции F_2-D_2-He приведёт к снижению удельного энергоёмкости HF-лазера N_Σ на 23%. При этом эксплуатационные свойства альтернативного топлива по отношению к «базовому» несколько улучшатся: $S/S_{base} = 0.92$ (отношению, меньшему единицы, отвечает более подходящий комплекс эксплуатационных свойств).

Для подтверждения достоверности результатов, полученных с помощью экспресс-оценки, можно обратиться к экспериментам и численным расчётам, выполненным при проведении исследований HF/DF-НХЛ разными авторами. Сравнительные оценки энергетической эффективности некоторых топливных композиций, полученные по результатам известных исследований автономных НХЛ с различными типами сопловых блоков, представлены в табл.3. Из таблицы видно, что соотношение удельных энергоёмкостей лазеров ε , полученных как численным моделированием, так и экспериментальным путём, в ряде случаев весьма близко к энергетическим оценкам для этих топлив, полученным по методике экспресс-оценки.

Табл.3. Результаты оценки сравнительной энергетической эффективности различных топливных композиций.

Топливо	Энергетическая эффективность ε	Степень отличия от экспресс-оценки (%)	Способ определения энергетической эффективности	Литературный источник
NF_3-D_2-He	0.73	1	Численный расчёт	[14]
	0.71	4	Эксперимент	[2]
	0.74	–	Экспресс-оценка	[12]
$N_2F_4-D_2-He$	0.79	1	Численный расчёт	[2]
	0.94	17	Эксперимент	[2]
	0.80	–	Экспресс-оценка	[12]
$F_2-C_6F_6-He$	0.98	8	Численный расчёт	[15]
	0.79	13	Эксперимент	[15]
	0.91	–	Экспресс-оценка	[12]
$NF_3-C_6F_6-He$	0.59	2	Численный расчёт	[16]
	0.58	–	Экспресс-оценка	[12]
$F_2-C_2H_4-He$	1.06	7	Эксперимент	[3]
	0.99	–	Экспресс-оценка	[5]
NF_3-H_2-He	0.78	5	Численный расчёт	[14]
	0.80	8	Эксперимент	[17]
	0.74	–	Экспресс-оценка	[12]
$NF_3-C_2H_4-He$	0.75	13	Эксперимент	[4]
	0.66	–	Экспресс-оценка	[12]

Максимальное отличие энергетических оценок от результатов численных расчётов составляет 8%, а от данных экспериментов – 17%, что следует признать весьма удовлетворительным.

5. Заключение

Для обоснования целесообразности проведения детальных исследований характеристик лазерного излучения и активной среды HF-НХЛ выполнена поисковая работа по предварительной оценке перспективности использования тетрафторэтилена в качестве первичного горючего. Результаты сравнительной оценки энергетической эффективности альтернативного ($F_2-C_2F_4-He$) и «базового» (F_2-D_2-He) топлив, полученные с помощью экспресс-оценки, достоверность которой подтверждена при сопоставлении с экспериментами и численными расчётами, выполненными отечественными и зарубежными авторами, приводят к следующему выводу.

Поскольку снижение удельной энергетики HF-лазера при замене дейтерия на тетрафторэтилен не слишком велико (23%), а стоимость C_2F_4 почти в 500 раз ниже стоимости D_2 , следует признать разумным использование дешевого тетрафторэтилена вместо дорогостоящего дейтерия в тех ситуациях, когда не ставится задача достижения предельной удельной энергетики лазера (например, при проведении большого объёма стендовых испытаний по отработке конструкции лазера и в исследованиях взаимодействия лазерного излучения с различными объектами). Исходя из этого для детальной сравнительной оценки изменения характеристик лазерного излучения и активной среды HF-НХЛ, работающего на топливе $F_2-C_2F_4-He$, целесообразно провести численные расчёты либо эксперименты.

Что касается практических вопросов использования тетрафторэтилена, то в России существует его промышленное

производство на ОАО «Кирово-Чепецкий химический комбинат» (Кировская обл.) и ОАО «Галоген» (Пермь), а в ФГУП «РНЦ «Прикладная химия» накоплен большой опыт эксплуатации этого продукта.

Автор считает своим долгом выразить благодарность И.А.Бассиной за помощь в проведении термодинамических расчётов.

1. Ratliff A.W., McDanal A.J., Kurzius S.C., et al. *AIAA Paper № 721* (1975).
2. Warren W.R., Schneider L.E., Warren D. *AIAA Paper № 3232* (1993).
3. Voignier F., Regnier P. *J. Phys.*, **41** (11), C9-45 (1980).
4. Wilson L.E. *J. Phys.*, **41** (11), C9-1 (1980).
5. Фёдоров И.А., Конкин С.В., Ротинян М.А., Третьяков Н.Е., Эцина А.Л. *Квантовая электроника*, **33**, 1038 (2003) [*Quantum Electron.*, **33**, 1038 (2003)].
6. Albertine J.R. *Proc. SPIE*, **1871**, 229 (1993).
7. *Термодинамические свойства индивидуальных веществ*. Под ред. В.П. Глушко (М.: Наука, 1978).
8. Веденеев В.И., Кибкало А.А. *Константы скоростей газофазных мономолекулярных реакций* (М.: Наука, 1972).
9. Кондратьев В.Н. *Константы скоростей газофазных реакций. Справочник* (М.: Наука, 1970).
10. Lloyd A.C. *Intern. J. Chem. Kinetic*, **3**, 39 (1971).
11. *Химические лазеры*. Под ред. Р. Гросса и Дж. Ботта (М.: Мир, 1980).
12. Фёдоров И.А. *Непрерывные химические лазеры на рабочих молекулах фтористого водорода и фтористого дейтерия* (СПб.: Изд-во Балтийского гос. техн. ун-та, 1994, кн.1).
13. *Химические лазеры*. Под ред. Н.Г.Басова (М.: Наука, 1982).
14. Башкин А.С., Гуров Л.В., Каторгин Б.И., Петрова С.Н., Полиновский Д.В. *Квантовая электроника*, **38**, 429 (2008) [*Quantum Electron.*, **38**, 429 (2008)].
15. Ackerman R.A. *Advanced Reactant Laser Performance Evaluation Study. Report № 28312-6004-RU-00* (Pasadena, Cal., USA: TRW Systems Group, 1975).
16. Ackerman R.A., Reiner R.J., Emanuel G. *Study and Demonstration of Liquid and Gaseous Reactants for Advanced Chemical Lasers. Final Report № 26395-6007-RU-00* (Pasadena, Cal., USA: TRW Systems Group, 1975).
17. Wilson L.E. *Proc. SPIE*, **76**, 51 (1976).