

О возможности применения тетрафторгидразина в качестве окислителя в сверхзвуковом непрерывном химическом HF-лазере

И.А.Фёдоров

Выполнено расчётно-экспериментальное исследование возможности замены трифторида азота NF_3 , используемого в составе топливной композиции NF_3-D_2-He в генераторе атомарного фтора сверхзвукового непрерывного химического HF-лазера, тетрафторгидразином N_2F_4 . В результате сопоставления удельных энергетических характеристик HF-лазера, работающего с использованием каждого из окислителей, показано, что замена трифторида азота на тетрафторгидразин в одной и той же модели лазера приводит к увеличению удельного энергосъёма на 13%–15%. При этом можно снизить удельную массу системы хранения окислителя (отношение массы системы хранения окислителя к мощности лазерной установки), уменьшить габариты бака окислителя и упростить конструкцию генератора активной среды за счёт устранения системы воспламенения окислителя NF_3 с первичным горючим D_2 .

Ключевые слова: сверхзвуковой непрерывный химический HF-лазер, окислитель, тетрафторгидразин, трифторид азота, удельные энергетические и массогабаритные характеристики.

1. Введение

В последние годы отмечен повышенный интерес к практическому применению лазерной техники в космосе [1–3]. Так, в работах [4, 5] обоснована возможность очистки околоземного космического пространства от фрагментов космического мусора с помощью лазерной установки на основе мощного сверхзвукового непрерывного химического HF-лазера (HF-НХЛ). Определены требования к её характеристикам – мощности и расходу лазерного излучения, длительности и частоте следования импульсов при работе в импульсно-периодическом режиме, продолжительности воздействия на фрагменты космического мусора для их ухода с орбиты защищаемого космического аппарата.

Объём технических задач, решаемых с помощью такой лазерной установки на орбите, в большой степени зависит от запаса компонентов топлива, необходимого для работы HF-НХЛ на борту космического аппарата. В связи с этим особое значение приобретают два важных фактора: энергетическая эффективность топлива, используемого в генераторе атомарного фтора (его удельный энергосъём $N_\Sigma = N/m_\Sigma$, где N – мощность излучения лазера; m_Σ – суммарный массовый расход топлива), определяющая массогабаритные характеристики лазерной установки, и его технологичность, определяющая эксплуатационные характеристики топлива.

Для мощных HF-НХЛ наиболее эффективным по критерию энергетика–технологичность в настоящее время признано топливо, в котором окислителем является трифторид азота NF_3 : NF_3-D_2-He [6]. Однако и оно не лишено определенных недостатков. Во-первых, трифто-

рид азота принято хранить в газообразном состоянии при высоком (до 15 МПа) давлении, что ухудшает массогабаритные характеристики системы хранения. Хранение же NF_3 в жидком состоянии требует, вследствие его криогенной природы, специальных средств, которые существенно усложняют лазерную систему в целом. Во-вторых, отсутствие самовоспламеняемости трифторида азота при контакте с известными первичными горючими требует использования специальной системы воспламенения (химической либо электроплазменной), усложняющей конструкцию генератора активной среды. И в-третьих, удельный энергосъём топлива NF_3-D_2-He не самый высокий. Замена трифторида азота более энергетически эффективным окислителем, например тетрафторгидразином N_2F_4 , может привести к получению нового топлива с повышенным удельным энергосъёмом [7].

Теоретически тетрафторгидразин рассматривается как перспективный окислитель ракетного топлива [8, 9]. Сведения же относительно практического использования N_2F_4 в лазерной технике крайне ограничены. Это обстоятельство и стало основанием для проведения расчётно-экспериментального исследования возможности использования топлива $N_2F_4-D_2-He$ для генератора атомарного фтора HF-НХЛ.

2. Тетрафторгидразин как химический компонент

Тетрафторгидразин N_2F_4 является представителем класса фторидов азота, фторсодержащим аналогом гидразина N_2H_4 , в котором атомы водорода замещены атомами фтора. Синтезирован сравнительно недавно, в 1958 г. [10], а уже в 1960 г. в США было налажено его промышленное производство конверсией трифторида азота над углем по реакции $2NF_3 + 0.5C \rightarrow N_2F_4 + 0.5CF_4$.

Физико-химические свойства тетрафторгидразина приведены в [11]. Для оценки эксплуатационных характеристик существенно, что N_2F_4 при нормальных условиях

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

является бесцветным газом, обладающим характерным запахом, похожим на запах фтора. Его критическая температура 309 К, критическое давление 7.7 МПа, по эксплуатационным свойствам он очень близок к фтору – токсичен и химически агрессивен. Является сильным окислителем. Обладает удовлетворительной термической стойкостью – начинает медленно разлагаться при нагревании до температуры 423–473 К по реакции $N_2F_4 = (4/3)NF_3 + (1/3)N_2$.

По энергетическим показателям тетрафторгидразин несколько уступает фтору, но имеет сравнительно высокую температуру кипения (200 К) и низкую температуру затвердевания (105 К), что облегчает его эксплуатацию по сравнению с другими фторсодержащими окислителями. Его можно хранить в жидком состоянии при температуре 293 К и относительно невысоком избыточном давлении, до 2.5 МПа, без принудительного охлаждения [11]. Кроме того, N_2F_4 самовоспламеняется при контакте с известными первичными горючими.

Важной особенностью молекулы N_2F_4 является её способность к равновесной диссоциации на радикалы NF_2 по схеме $N_2F_4 \leftrightarrow 2NF_2$, степень которой зависит от температуры и давления. Указанная особенность позволяет рассматривать тетрафторгидразин и как молекулу N_2F_4 и как радикал NF_2 . Такая двойственная структура отражается на химических свойствах тетрафторгидразина. Имеющиеся экспериментальные данные показывают, что N_2F_4 способен к двойственному химическому действию – дифтораминариванию и фторированию, причём фторирующее действие связано с проявлением свойств молекулы N_2F_4 .

Для диссоциации молекулы N_2F_4 необходимо разорвать два типа связей: N–N и N–F. По данным [11] энергия разрыва связи N–N составляет 21.5 ккал/моль, а средняя энергия разрыва связи N–F равна 70.5 ккал/моль. У молекулы NF_3 энергия разрыва первой связи (N–F) составляет 55 ккал/моль, второй связи (NF–F) – 80 ккал/моль и третьей связи (NF₂–F) – 55 ккал/моль. Таким образом, суммарные затраты энергии на диссоциацию молекулы NF_3 существенно превышают затраты на диссоциацию молекулы N_2F_4 . Меньшие энергетические затраты на диссоциацию молекулы тетрафторгидразина, очевидно, потребуют меньших количеств окислителя для получения одинаковых количеств атомарного фтора, что в свою очередь приведёт к росту удельного энергосъёма N_2 . Поиск ответа на вопрос, насколько существенным будет этот рост, и является целью настоящей работы.

Понятно, что для объективной оценки сравнительной энергетической эффективности различных топлив их сопоставление следует проводить при оптимальных химических составах, обеспечивающих максимальный для каждого топлива уровень удельного энергосъёма. Для определения таких составов в настоящей работе выполнено специальное расчётно-экспериментальное исследование.

3. Условия проведения расчётов

Для получения достаточно точных результатов численных расчётов энергетических параметров HF–НХЛ следует использовать по возможности более полные в газодинамическом и кинетическом отношениях математические модели процессов в элементах его газодинамического тракта. С учётом этого обстоятельства в настоящей

работе использовались следующие разработанные в ФГУП «РНЦ "Прикладная химия"» модели: двумерная модель химически равновесного течения в камере сгорания генератора атомарного фтора, учитывающая вязкие эффекты и теплообмен в приближении узкого канала [12]; двумерная модель течения в соплах соплового блока, включающая описание химических неравновесных реакций в газовой фазе и каталитической рекомбинации атомов фтора на стенках сопла, а также учитывающая вязкие эффекты и теплообмен на стенках и их влияние на невязкий поток в приближении пограничного слоя [13]; двумерная модель течения в резонаторе Фабри–Перо, включающая описание химической, колебательной и радиационной кинетики, а также учитывающая вязкие эффекты и конвективный перенос на основе системы уравнений динамики многокомпонентной химически реагирующей газовой смеси в приближении узкого канала [14].

Выходные энергетические характеристики лазера определялись путём последовательного расчёта течения в отдельных элементах его газодинамического тракта с помощью перечисленных моделей. Лазерные характеристики определялись исходя из условия квазистационарной генерации на отдельных колебательно–вращательных переходах молекулы HF(*v*) в предположении, что на каждом колебательно–вращательном уровне имеет место равновесное (больцмановское) распределение по вращательным уровням при локальной поступательной температуре смеси. Уширение спектральной линии предполагалось неоднородным доплеровским, характерным для газов при низких давлениях.

С целью определения оптимального химического состава топлив на основе трифторида азота и тетрафторгидразина проведены две серии численных параметрических расчётов. В каждой серии варьировались коэффициенты α и ψ , определяющие состав топлив, условные формулы которых имели следующий вид:

$$D_2 + (2/3)\alpha NF_3 + [\psi(\alpha - 1) - \alpha/3] He + \alpha_2(\alpha - 1)H_2, \quad (1)$$

$$D_2 + (1/2)\alpha N_2F_4 + [\psi(\alpha - 1) - \alpha/2] He + \alpha_2(\alpha - 1)H_2. \quad (2)$$

Здесь $\alpha = n_{F_2}/n_{D_2}$ – коэффициент избытка окислителя, определяемый по молекулярному фтору; $\psi = n_{He} + n_{N_2}/(n_{F_2} - n_{D_2})$ – суммарное число молей разбавителя (гелия и азота), приходящееся на один моль свободного фтора в составе продуктов сгорания; $\alpha_2 = n_{H_2}/(n_{F_2} - n_{D_2})$ – коэффициент избытка вторичного горючего; n_{H_2} , n_{F_2} , n_{D_2} , n_{He} , n_{N_2} – число молей водорода, фтора, дейтерия, гелия и азота. При записи формул (1) и (2) предполагается, что атомы азота в составе продуктов сгорания содержатся только в свободных молекулах азота. Это подтверждается термодинамическими расчётами, согласно которым содержание неустойчивых радикалов типа NF, NF₂, а также атомов N и исходных молекул NF₃ и N₂F₄ в составе продуктов сгорания пренебрежимо мало (не превышает десятых долей процента).

При проведении численных расчётов коэффициенты избытка окислителя и разбавления топливной смеси изменялись в следующих диапазонах: $\alpha = 1.3 - 2.0$, $\psi = 5 - 20$. Коэффициент избытка вторичного горючего α_2 принимался равным 20. Коэффициенты поглощения зеркал резонатора полагались равными 5%, что примерно соответствовало реальному качеству зеркал, а коэффициент пропускания выходного зеркала принимался равным нулю

(мощность лазера измерялась методом закрытого резонатора). Длина оптического пути в резонаторе принята равной 250 мм, как у экспериментальной стендовой модели исследуемого HF-лазера [15], а давление в камере сгорания генератора атомарного фтора $p_c = 0.1$ МПа.

4. Условия проведения экспериментов

Экспериментальная часть исследования проводилась на стендовой установке с использованием модели HF-НХЛ с расчётной мощностью 5 кВт, оснащённой плоским сопловым блоком, отвечающим схеме смешения реагентов сопло–сопло [15]. Длина камеры сгорания генератора атомарного фтора (230 мм) была принята по результатам [6] как среднее между длинами камеры сгорания при работе лазера на топливах с использованием молекулярного фтора (210 мм) и трифторида азота (250 мм). Тетрафторгидразин, синтезированный на опытной установке ФГУП «РНЦ "Прикладная химия"», содержал по объёму 92% основного продукта. Все компоненты топлива находились в газообразном состоянии.

Эксперименты проводились в два этапа на топливах (1) и (2) при химических составах топлив, определяемых коэффициентами $\alpha = 1.4–1.9$, $\psi = 5–20$, $\alpha_2 = 20$. Давление в камере сгорания и начальное давление в барокамере, где размещён генератор активной среды, оставались неизменными и равными 0.1 МПа и 0.1 кПа соответственно. Воспроизводимость экспериментов обеспечивалась трёхрежимными пусками, в которых первый и третий режимы отвечали эталонному опыту с использованием в качестве окислителя молекулярного фтора, а второй режим – опыту с использованием либо трифторида азота, либо тетрафторгидразина.

Мощность лазерного излучения измерялась по методике работы [16] с помощью устойчивого двухзеркального оптического резонатора закрытого типа, образованного неохлаждаемыми сферическими зеркалами-калориметрами диаметром 60 мм с радиусами кривизны 5 м из полированной бронзы марки БрХ-0.8. Положение оптической оси резонатора относительно среза соплового блока x_c принималось оптимальным с точки зрения достижения максимального удельного энергосъёма: для топлива $N_2F_4–D_2–He$ параметр $x_c^{opt} = 28$ мм, а для топлива $NF_3–D_2–He$ он составил 20 мм. Для воспламенения NF_3 использовался (как наиболее простой и надёжный) химический способ зажигания. Он заключался в подаче в камеру сгорания генератора атомарного фтора на период пуска (до 0.5 с) молекулярного фтора с последующей постепенной его заменой на NF_3 . Что касается N_2F_4 , то он надёжно самовоспламенялся при контакте с D_2 во всех испытаниях.

5. Результаты расчётно-экспериментального исследования

Энергетические преимущества топлива $N_2F_4–D_2–He$ связаны с большим тепловым эффектом реакции тетрафторгидразина с дейтерием, что позволяет повысить массовый выход атомарного фтора. Это следует из результатов термодинамических расчётов, выполненных для адиабатических условий сгорания в широком диапазоне изменения коэффициентов α и ψ ($\alpha = 1.4–2.0$ и $\psi = 5–20$ при $p_c = 0.1$ МПа). Помимо увеличения концентрации атомарного фтора, повышение температуры в камере сгора-

ния его генератора при использовании N_2F_4 приводит к повышению температуры смеси на выходе из сопел окислительного газа. Несмотря на увеличение молекулярной массы, это способствует ускорению диффузии струй окислительного газа (смесь $F–DF–He–N_2$) и вторичного горючего (H_2) в полости резонатора (лазерная камера) и, тем самым, улучшению энергетических характеристик HF-лазера.

На рис. 1 и 2 приведены расчётные зависимости удельного энергосъёма N_Σ от коэффициентов α и ψ при работе HF-лазера на топливах $NF_3–D_2–He$ и $N_2F_4–D_2–He$. Зависимости $N_\Sigma = f(\psi)$ при $\alpha = const$ и $N_\Sigma = f(\alpha)$ при $\psi = const$ для обоих топлив имеют отчётливо выраженные максимумы. Их происхождение можно объяснить следующим образом.

При $\alpha = const$ (рис. 1, а и 2, а) и малых коэффициентах разбавления ψ тепловыделение реакции накачки $F + H_2 \rightarrow HF(v) + H$ приводит к резкому росту температуры активной среды. При этом уменьшается протяжённость зоны генерации излучения и снижается эффективность преобразования химической энергии топлива в энергию когерентного излучения, характеризуемая величиной удельной мощности на единицу массового расхода свободного атомарного фтора N_F . В результате снижается и удельный энергосъём N_Σ . При слишком больших значениях ψ рост удельной мощности N_F при увеличении коэффициента ψ уже не может компенсировать снижение содержания атомов фтора в потоке с увеличением коэффициента ψ за счёт как их рекомбинации, так и уменьшения их доли вследствие разбавления. Последнее обстоятельство приводит к уменьшению N_Σ .

В случае $\psi = const$ (рис. 1, б и 2, б) уменьшение удельного энергосъёма N_Σ при малых значениях α обусловлено незначительным содержанием в продуктах сгорания атомов фтора и высоким содержанием в них молекул DF , являющихся активными релаксантами излучающих моле-

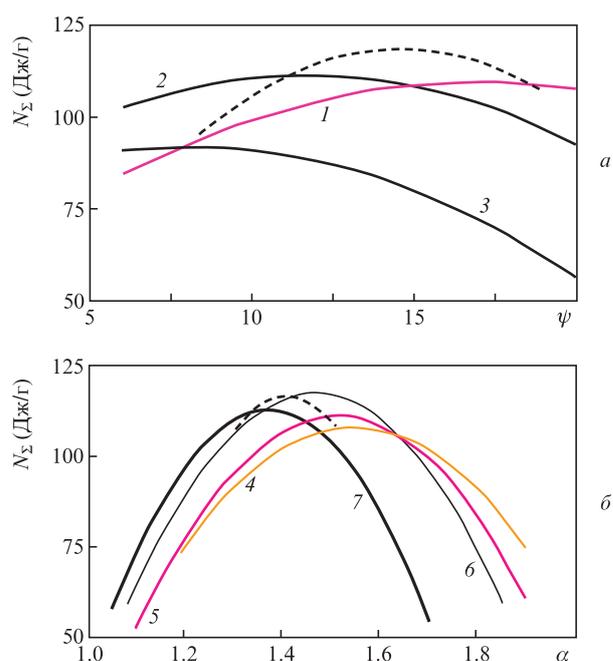


Рис. 1. Расчётные зависимости удельного энергосъёма HF-НХЛ от коэффициентов разбавления (а) и избытка окислителя (б) при использовании топлива $NF_3–D_2–He$: $\alpha = 1.3$ (1), 1.5 (2), 1.7 (3); $\psi = 8$ (4), 10 (5), 15 (6), 20 (7).

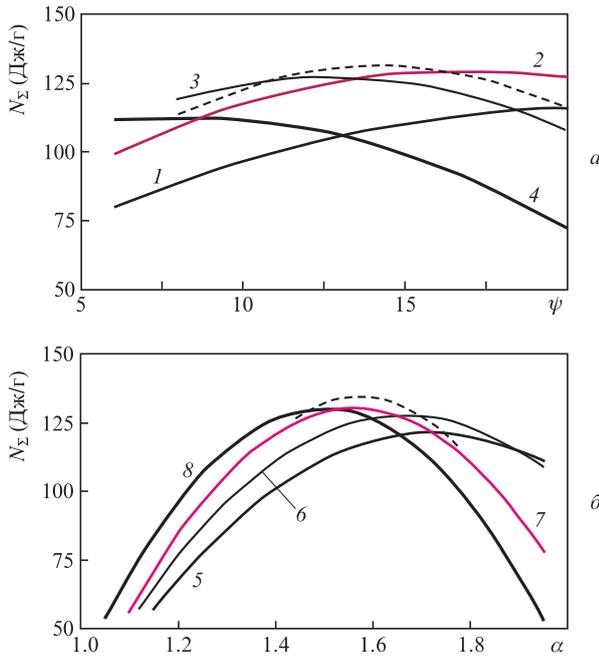


Рис.2. Расчётные зависимости удельного энергосъёма HF-НХЛ от коэффициентов разбавления (а) и избытка окислителя (б) при использовании топлива $N_2F_4-D_2-He$: $\alpha = 1.3$ (1), 1.5 (2), 1.7 (3), 1.9 (4); $\psi = 8$ (5), 10 (6), 15 (7), 20 (8).

кул HF(ψ). При больших значениях коэффициента α снижение удельного энергосъёма вызвано уменьшением степени диссоциации окислителя в камере сгорания генератора атомарного фтора.

Наличие максимумов зависимостей $N_{\Sigma} = f(\alpha)$ и $N_{\Sigma} = f(\psi)$ позволяет определить их оптимальные значения, отвечающие максимальному удельному энергосъёму N_{Σ}^{\max} . Для этого через точки максимумов каждого семейства кривых $N_{\Sigma} = f(\psi)$ при $\alpha = \text{const}$ (рис.1,а и 2,а) и $N_{\Sigma} = f(\alpha)$ при $\psi = \text{const}$ (рис.1,б и 2,б) проводят огибающие – «оптимальные» кривые (штриховые линии), которые и определяют значения α_{opt} и ψ_{opt} (оптимальный химический состав топлив NF_3-D_2-He и $N_2F_4-D_2-He$). Аналогичные семейства кривых были получены экспериментально.

Указанные коэффициенты оказались следующими: $\alpha_{\text{opt}}^{\text{theor}}/\alpha_{\text{opt}}^{\text{exp}} = 1.43/1.44$, $\psi_{\text{opt}}^{\text{theor}}/\psi_{\text{opt}}^{\text{exp}} = 13.0/11.6$ (для топлива NF_3-D_2-He) и $\alpha_{\text{opt}}^{\text{theor}}/\alpha_{\text{opt}}^{\text{exp}} = 1.62/1.59$, $\psi_{\text{opt}}^{\text{theor}}/\psi_{\text{opt}}^{\text{exp}} = 15/12$ (для топлива $N_2F_4-D_2-He$). Видно, что точность расчётного определения оптимальных химических составов топлив достаточно высока. Практически совпадают с экспериментальными и расчётные значения максимальных удельных энергосъёмов N_{Σ}^{\max} : для топлива NF_3-D_2-He расчётное значение $N_{\Sigma}^{\max} = 117$ Дж/г, экспериментальное – 100 Дж/г, для топлива $N_2F_4-D_2-He$ это 134 и 113 Дж/г соответственно.

Приведённые данные позволяют провести прямое сопоставление удельных энергосъёмов HF-лазера, работающего с использованием топлив с разными окислителями. Оно показывает, что замена трифторида азота тетрафторгидразином в исследуемой модели лазера с сопловым блоком, отвечающим схеме смешения реагентов сопло–сопло, приводит к увеличению N_{Σ} на 13%–15%.

В работе [7] на экспериментальной модели HF-лазера мощностью менее 1 кВт с сопловым блоком с размерами 150×33 мм принципиально другой конструкции (на основе моносопла, отвечающего схеме гиперзвукового низко-

температурного течения) при работе с использованием N_2F_4 и NF_3 получено аналогичное соотношение удельных энергосъёмов (прирост 13% при использовании N_2F_4).

С одной стороны, такой прирост следует признать весьма умеренным. Но с другой стороны, как отмечалось выше, внимание к использованию фторидов азота в качестве окислителей в сверхзвуковых HF-НХЛ обусловлено, главным образом, их эксплуатационными преимуществами. Поскольку оценка возможного эффекта от их реализации представляет определённый интерес, выполнен сравнительный анализ массогабаритных характеристик системы хранения окислителя лазерной установки на базе мощного HF-лазера, работающей с использованием двух типов окислителей – трифторида азота и тетрафторгидразина.

6. Сравнительная оценка массогабаритных характеристик системы хранения окислителя мощного HF-лазера

Для определённости рассмотрена установка с уровнем мощности лазерного излучения $N = 100$ кВт и длительностью непрерывной работы $\tau = 100$ с. Исходные данные для расчёта приняты с учётом результатов расчётно-экспериментального исследования (разд.5). С целью упрощения расчётов в составе системы хранения окислителя учитывались массы только окислителя и бака для его хранения. Масса окислителя определялась с учётом оптимального химического состава топлива (коэффициенты α_{opt} и ψ_{opt}), уровня выходной мощности излучения лазера N , длительности его работы τ и суммарного расхода топливной смеси $m_{\Sigma} = N/N_{\Sigma}^{\max}$.

Баки для хранения окислителей представляли собой шаровые баллоны. Принятые условия хранения окислителей в баках представлены в табл.1. Расчёт массы шарового баллона сводился к определению его объёма, внутреннего диаметра и толщины стенки. Приняты следующие параметры, необходимые для проведения этих расчётов: материал баллонов – нержавеющая сталь с удельным весом 7920 кг/м³, предел прочности материала – 530 МПа, коэффициент запаса прочности материала – 2, коэффициент заполнения баллона жидким продуктом (тетрафторгидразин) – 0.8.

Табл.1. Условия хранения окислителей в топливных баках лазерной установки.

Тип окислителя	Давление в баке (МПа)	Температура компонента в баке (К)	Плотность компонента в баке (кг/м ³)	Агрегатное состояние
NF_3	15.0	293	418.6	Газ
N_2F_4	2.5	293	1454.0	Жидкость

Расчёты удельной массы системы хранения окислителя M/N (M – масса системы хранения окислителя) показали, что реализация эксплуатационных преимуществ тетрафторгидразина позволяет снизить удельную массу системы его хранения (0.8 кг/кВт) по сравнению с удельной массой системы хранения трифторида азота (2.5 кг/кВт) в три раза. Относительная простота перевода тетрафторгидразина в жидкое состояние и хранения его в этом состоянии без принудительного охлаждения позволяют снизить объём и, соответственно, габаритные размеры бака

окислителя – диаметр бака с N_2F_4 (0.6 м) оказался в 1.7 раза меньше диаметра бака с NF_3 (1.0 м).

Таким образом, результаты выполненной работы показали, что замена трифторида азота тетрафторгидразином в составе топлива NF_3-D_2-He для генератора атомарного фтора сверхзвукового непрерывного химического HF-лазера позволит увеличить его удельный энергоём на 13%–15%, снизить удельную массу системы хранения окислителя и габаритные размеры бака окислителя, а также упростить конструкцию генератора активной среды за счёт устранения системы воспламенения окислителя NF_3 при контакте с первичным горючим D_2 . Указанные преимущества могут быть реализованы вне зависимости от конструкции соплового блока. Что касается доступности тетрафторгидразина, то в США в 1990-х годах производился технический продукт, содержащий по объёму 96% N_2F_4 . Его стоимость составляла 200\$ США за килограмм. В России этот продукт не производится.

Автор считает своим долгом выразить благодарность В.К.Ребонэ, И.А.Бассиной, М.Х.Стрельцу и М.Л.Шуру за помощь в проведении экспериментов, термодинамических и численных расчётов.

1. Кузнецов Л.И., Савичев В.Ю., Тихонов Н.Н. *Квантовая электроника*, **25**, 372 (1998) [*Quantum Electron.*, **28**, 361 (1998)].
2. Sholl W.O. *J. Spacecr. Rock.*, **39**, 81 (2002).
3. Shen S., Jin X., Hao C. *Chin. J. Aeronaut.*, **27**, 805 (2014).
4. Авдеев А.В., Башкин А.С., Шушарин Е.И. *Труды НПО Энергомаш им. В.П. Глушко*, № 27, 281 (2010).
5. Авдеев А.В., Башкин А.С., Каторгин Б.И., Парфеньев М.В. *Квантовая электроника*, **41**, 669 (2011) [*Quantum Electron.*, **41**, 669 (2011)].
6. Федоров И.А. *Квантовая электроника*, **50**, 157 (2020) [*Quantum Electron.*, **50**, 157 (2020)].
7. Warren W.R., Schneider L.E., Warren D. *AIAA Paper*, № 3232 (1993).
8. Зрелов В.Н., Серегин Е.П. *Жидкие ракетные топлива* (М.: Химия, 1975).
9. Штехер М.С. *Топлива и рабочие тела ракетных двигателей* (М.: Машиностроение, 1976).
10. Colburn C.V., Kennedy A. *J. Am. Chem. Soc.*, **80**, 5004 (1958).
11. Панкратов А.В. *Химия фторидов азота* (М.: Химия, 1973).
12. Лапин Ю.В., Нехамкина О.А., Поспелов В.А., Стрелец М.Х., Шур М.Л. *Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газа* (М.: ВИНТИ, 1985, т.19, с. 86–185).
13. Бассина И.А., Дорот В.Л., Стрелец М.Х. *Изв. АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа*, № 3, 120 (1979).
14. Лавров А.В., Поспелов В.А., Федотов А.В., Шур М.Л. *Физика горения и взрыва*, **15**, 89 (1979).
15. Федоров И.А. *Квантовая электроника*, **49**, 735 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 735 (2019)].
16. Федоров И.А. *Непрерывные химические лазеры на рабочих молекулах фтористого водорода и фтористого дейтерия* (СПб.: Изд-во Балтийского гос. техн. ун-та, 1994, кн. 2).