

Энергетические характеристики сверхзвукового непрерывного химического HF-лазера, работающего с использованием продуктов разложения гидразина

И.А.Фёдоров

Выполнены расчётные и экспериментальные исследования удельных энергетических характеристик сверхзвукового непрерывного химического HF-лазера с плоским сопловым блоком, отвечающим схеме смешения реагентов сопло–сопло, в котором в качестве вторичного горючего вместо чистого водорода используются продукты каталитического разложения гидразина N_2H_4 ($H_2 + N_2 + NH_3$). В результате экспериментов с холодными (300 К) модельными смесями установлено, что в этом случае удельный энергоём лазер снижается на 43% по сравнению с вариантом работы на чистом водороде. Расчёты показали, что основная причина снижения удельной энергетики лазера заключается в повышении температуры в зоне смешения струй окислительного газа и вторичного горючего. Выявлено сильное влияние аммиака. Учёт реального разогрева продуктов (до 1000 К) в ходе каталитического разложения N_2H_4 позволяет приблизить уровень удельного энергоёма к энергоёму при его работе на чистом водороде на 13%, что приведёт к падению удельного энергоёма только на 30% при условии отсутствия в продуктах разложения NH_3 .

Ключевые слова: сверхзвуковой непрерывный химический HF-лазер, вторичное горючее, продукты разложения гидразина, аммиак, удельные энергетические характеристики.

1. Введение

Сверхзвуковой непрерывный химический HF-лазер (HF-НХЛ) автономного типа представляет собой четырёхкомпонентную топливную систему, включающую в себя первичное горючее (дейтерий D_2), фторсодержащий окислитель (обычно фтор F_2), инертный разбавитель (гелий He) и вторичное горючее (водород H_2). В такой системе для наработки атомов фтора, которые играют роль активных центров, необходимых для инициирования реакции накачки, используется вспомогательная химическая реакция фторсодержащего окислителя с первичным горючим в присутствии инертного разбавителя: $\alpha F_2 + D_2 + \psi He \rightarrow 2DF + 2(\alpha - 1)F + \psi(\alpha - 1)He$ (α – коэффициент избытка окислителя (фтор) в камере сгорания генератора атомарного фтора, ψ – степень разбавления топливной смеси гелием в камере сгорания генератора атомарного фтора); для накачки использовалась экзотермическая реакция атомов фтора с вторичным горючим: $F + H_2 \rightarrow HF(v) + H$. В результате в лазерной камере (полость резонатора) образуется активная среда – колебательно-возбуждённые молекулы фторида водорода $HF(v)$ с инверсным распределением населённостей по колебательным уровням вплоть до четвёртого ($v = 1-4$).

Уникальные достоинства лазеров этого типа – высокий энергетический потенциал, отсутствие необходимости во внешнем источнике энергии и возможность генерации излучения в среднем ИК диапазоне спектра ($\lambda = 2.6-3.2$ мкм) – стимулируют активный поиск перспектив создания на их основе различных вариантов мобильных лазерных установок. Так, в работе [1] показана возможность использования HF-НХЛ для лазерной локации и

защиты космических аппаратов от микрометеоритных частиц и космического мусора, а в работе [2] рассмотрены области возможного применения многочастотных НХЛ для зондирования атмосферы Земли с целью контроля окружающей среды. В этих случаях НХЛ целесообразно размещать на высотных носителях – космических аппаратах или самолётах, как предложено, например, в [3]. При этом возникает задача нахождения оптимальной технической реализации основных подсистем лазерной установки для обеспечения приемлемого баланса между её энергетическими и массогабаритными характеристиками.

Значительную часть (50%–70%) мобильной лазерной установки по массе и габаритам составляет подсистема хранения и подачи компонентов топлива, в которую входят компримирующие устройства, баллоны высокого давления, а в некоторых случаях и криогенное оборудование. Применение в качестве вторичного горючего водорода в газообразном либо криогенном состоянии ввиду его низкой плотности в газовой фазе и низкой температуры и плотности в жидкой фазе создаёт проблемы, связанные с массогабаритными характеристиками подсистемы хранения и ресурсом хранения взрыво- и пожароопасных веществ. Для решения этих проблем в мобильных лазерных установках водород предпочтительнее хранить в виде водородсодержащих соединений, а получать его по мере необходимости за счёт химических реакций. Отсюда и возникла идея разработки компактных твердотопливных [4] и жидкостных [5] генераторов газообразного водорода, не требующих использования перечисленных выше устройств и позволяющих существенно улучшить массогабаритные характеристики подсистемы хранения и подачи компонентов топлива мобильной лазерной установки на основе HF-НХЛ.

Уровень технической проработки твердотопливных генераторов водорода к настоящему времени невысок и находится на стадии выбора методов генерации, их анализа и оценки номенклатуры исходных водородсодержа-

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

Поступила в редакцию 30 сентября 2019 г.

щих веществ и рецептур смесей на их основе. Прямые лазерные эксперименты с использованием твердопливного генератора водорода проводились только на мало-мощных (менее 10 Вт) лабораторных установках [6].

Что касается жидкостного генератора водорода, то он может быть создан на основе каталитического разложения гидразина N_2H_4 [5]. Выбор последнего определяется высоким (12.5 масс.%) содержанием в его составе водорода, большой плотностью (примерно в 10 раз превышающей плотность H_2) и богатым опытом использования в ракетно-космической технике (N_2H_4 широко применяется в качестве однокомпонентного ракетного топлива) [7]. Последнее обстоятельство весьма важно при базировании НФ-НХЛ на космическом носителе. Поскольку N_2H_4 является топливом для микроракетных двигателей системы ориентации космических аппаратов, то он же может быть использован и для генерации водорода при работе лазера.

Разложение гидразина на катализаторе происходит согласно реакции [8]

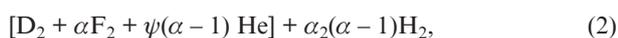


где $x = 0-1$ – степень разложения аммиака; $Q = (80-44x)$ ккал/моль – количество тепла, выделенного при разложении гидразина. Активное вещество катализатора – металл из группы Ir, Ni, Nb, Mo, Ru. Он наносится на пористые гранулы вещества-носителя, которым является окись алюминия Al_2O_3 . Такой катализатор способен активно разлагать гидразин при комнатной температуре. Разложение гидразина – процесс экзотермический, причём температура продуктов его разложения может достигать 1000 К. Понятно, что образованные при этом побочные продукты – азот и особенно аммиак – могут оказать негативное влияние на энергетические характеристики НФ-лазера. Расчётно-экспериментальная оценка характера и степени этого влияния и является целью настоящей работы.

2. Условия проведения экспериментов

Методически экспериментальное исследование было организовано таким образом, чтобы оценить влияние каждого из продуктов разложения гидразина – H_2 , N_2 и NH_3 – в отдельности. При этом сначала проводились эталонные испытания, в которых в качестве вторичного горючего использовался чистый водород, затем испытания с добавлением азота в водород и далее с добавлением аммиака в смесь водорода и азота. Мольный состав смесей подбирался таким, чтобы содержание азота и аммиака в них соответствовало содержанию этих веществ в продуктах разложения гидразина на реальных каталитических пакетах, а именно: 61%–65% H_2 , 31%–32% N_2 , 3%–5% NH_3 . Температура торможения поддерживалась на уровне 300 К.

Эксперименты проводились на стендовой установке с использованием модели НФ-лазера с расчётной мощностью 5 кВт, оснащённой плоским сопловым блоком, отвечающим схеме смешения реагентов сопло – сопло [9]. В эталонных испытаниях использовалась топливная композиция с условной формулой



где $\alpha = n_{F_2}/n_{D_2}$; $\psi = n_{He}/(n_{F_2} - n_{D_2})$; $\alpha_2 = n_{H_2}/(n_{F_2} - n_{D_2})$ – коэффициент избытка вторичного горючего (водород) на срезе соплового блока; n_{H_2} , n_{F_2} , n_{D_2} , n_{He} – число молей водорода, фтора, дейтерия и гелия.

В дальнейших испытаниях водород в топливной композиции (2) последовательно заменялся указанными выше смесями. Соотношение мольных долей азота и водорода в модельной смеси было принято равным их соотношению в гидразине: $n_{N_2}/n_{H_2} = 1:2$. Воспроизводимость экспериментов обеспечивалась трёхрежимными пусками, в которых два крайних режима отвечали эталонному опыту, а средний режим – опыту с добавлением азота или аммиака. Состав рабочей смеси в генераторе атомарного фтора во всех испытаниях поддерживался постоянным и соответствовал коэффициенту избытка окислителя $\alpha = 1.7$ и степени разбавления $\psi = 10$, близким к оптимальным для исследуемой модели НФ-лазера, а давление $p_c = 0.09$ МПа отвечало максимальной мощности генерации излучения. Мощность лазерного излучения измерялась методом закрытого резонатора с помощью зеркального калориметра (диаметр зеркал 60 мм) с нулевой прозрачностью по методике [10] с погрешностью $\pm 7\%$. Часть излучения, выходящая через отверстие диаметром 2 мм в центре одного из зеркал, направлялась в скоростной сканирующий спектрометр Model 501 (OCLI Instruments). Спектр сканировался в диапазоне $\lambda = 2.6-3.2$ мкм за время 1.25 с. В качестве приёмника излучения использовался фоторезистор ФСГ-22-3А2 на основе германия, легированного золотом, сигнал которого усиливался и регистрировался электронным (Tektronix-565) и светолучевым (Н-117) осциллографами.

3. Результаты экспериментов

В первой серии испытаний определялись зависимости удельной мощности $N_F = N/m_F$ и удельного энергосъёма $N_\Sigma = N/m_\Sigma$ от коэффициента избытка вторичного горючего (чистый водород) α_2 , где N – абсолютная мощность излучения лазера; m_F – массовый расход свободного атомарного фтора; m_Σ – суммарный массовый расход топливной смеси.

Полученные зависимости (рис. 1 и 2) свидетельствуют о том, что добавление азота в струю вторичного горючего (чистый водород) приводит к существенному снижению удельных энергетических характеристик НФ-лазера. Так, максимальная удельная мощность N_F , характеризующая эффективность преобразования химической энергии в энергию когерентного излучения, снижается на 33%

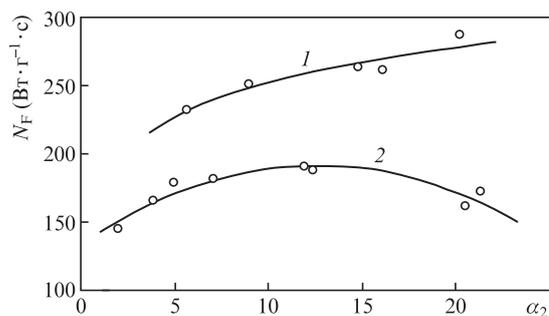


Рис. 1. Зависимости удельной мощности НФ-лазера N_F от коэффициента избытка вторичного горючего (чистого H_2) при использовании в качестве вторичного горючего H_2 (1) и смеси $H_2 + N_2$ (2).

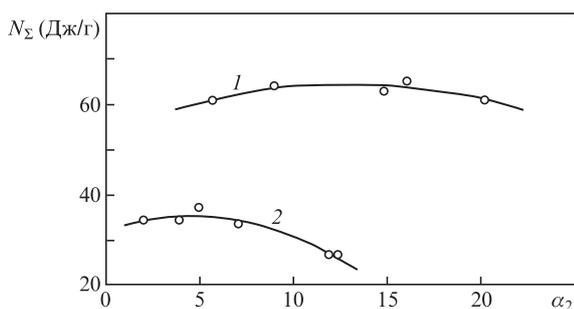


Рис.2. Зависимости удельного энергосъёма HF-лазера N_Σ от коэффициента избытка вторичного горючего (чистого H_2) при использовании в качестве вторичного горючего H_2 (1) и смеси $H_2 + N_2$ (2).

(рис.1), а максимальный удельный энергосъём N_Σ – на 43% (рис.2). При использовании смеси $H_2 + N_2$ зависимости от α_2 удельных энергетических характеристик становятся более ярко выраженными, а их максимальные уровни достигаются при значительно меньших значениях коэффициента α_2 , чем при использовании в качестве вторичного горючего чистого водорода.

Эксперименты по оценке влияния добавки во вторичное горючее аммиака во второй серии испытаний проводились при фиксированном массовом расходе смеси $H_2 + N_2$, соответствующем максимуму удельной мощности N_F , определенной в предыдущей серии испытаний. Оказалось, что наличие аммиака в струе вторичного горючего очень сильно влияет на удельные энергетические характеристики лазера: с увеличением содержания аммиака в смеси значения N_F и N_Σ резко уменьшаются, а при объемном составе смеси 60% $H_2 + 30\% N_2 + 10\% NH_3$ генерация излучения практически отсутствует (рис.3).

Полученные в эксперименте данные позволяют сформулировать предварительные требования к катализаторам для разложения N_2H_4 применительно к HF-лазеру.

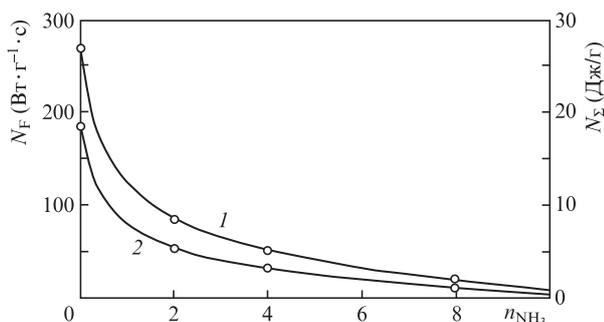


Рис.3. Зависимости удельных энергетических характеристик HF-лазера N_F (1) и N_Σ (2) от объемного содержания аммиака n_{NH_3} во вторичном горючем (смесь $H_2 + N_2 + NH_3$).

4. Условия проведения расчётов и их результаты

Для объяснения полученных экспериментальных результатов была выполнена серия расчетов. Расчётный анализ проводился на основе комплекса математических моделей процессов, протекающих в элементах газодинамического тракта HF-НХЛ, следующим образом. Параметры продуктов сгорания на выходе из генератора атомарного фтора определялись в ходе термодинамического расчёта при известных из экспериментов значениях давления в камере сгорания p_c , коэффициента избытка окислителя α и степени разбавления смеси гелием ψ . Параметры потока на срезе соплового блока определялись из расчёта невязкого одномерного замороженного течения в соплах окислительного газа и вторичного горючего. Расчёт параметров активной среды в лазерной камере и энергетических характеристик HF-лазера проводился на основе приближения пограничного слоя по методике [11] с привлечением кинетических данных [12]. Использование таких моделей, относящихся к моделям пониженной размерности, приводит к завышению энергетических характеристик HF-лазера. Однако, учитывая цель настоящего исследования, состоящего в оценке влияния побочных продуктов разложения гидразина, а не в точном определении энергетических характеристик, это обстоятельство следует признать несущественным. Важно то, что затраты вычислительных ресурсов, необходимых для проведения расчётов, значительно сокращаются.

Результаты расчётов представлены в табл.1. Расчёты №1 и 2 соответствуют условиям проведения эталонных испытаний и испытаний, в которых в качестве вторичного горючего использовалась смесь водорода с азотом (см. рис.1 и 2). Их результаты качественно соответствуют экспериментальным данным. Так, снижение удельных энергетических характеристик N_F и N_Σ при добавлении азота к водороду в эксперименте составляет 33% и 43% соответственно, а их расчётные значения снижаются на 54% и 60%. К наиболее вероятным причинам такого снижения можно отнести три фактора. Во-первых, колебательно-поступательную (VT) релаксацию колебательно-возбуждённых молекул $HF(v)$ на молекулах азота. Во-вторых, ухудшение газодинамических условий смешения струй окислительного газа (смесь $F + F_2 + DF + He$ из генератора атомарного фтора) и вторичного горючего, связанное с уменьшением скорости истечения струи вторичного горючего из сопел, происходящим из-за увеличения его молекулярной массы при фиксированной геометрии сопла. В-третьих, ухудшение диффузионных свойств струи вторичного горючего вследствие увеличения его молекулярной массы.

Табл.1. Результаты расчётов.

Номер расчёта	Состав вторичного горючего (% по объёму)	α_2	u_{fuel} (м/с)	T_{fuel} (К)	u_{oxi} (м/с)	N_F (Вт·г ⁻¹ ·с)	N_Σ (Дж/г)
1	100% H_2	5.7	2370	300	2966	910	218
2	67% $H_2 + 33\% N_2$	1.9	1027	300	2966	419	85
3	67% $H_2 + 33\% N_2$	1.9	1027	300	2966	420	85
4	67% $H_2 + 33\% N_2$	4.3	2370	300	2966	660	104
5	67% $H_2 + 33\% N_2$	1.0	1846	1000	2966	543	111

Примечание: α_2 – коэффициент избытка вторичного горючего (водород) на срезе соплового блока; u_{fuel} , u_{oxi} – скорости истечения из сопел вторичного горючего и окислительного газа соответственно; T_{fuel} – температура торможения струи вторичного горючего.

Для оценки относительной роли каждого из перечисленных факторов были выполнены расчёты № 3 и 4. Расчёт № 3 выполнен без учета VT-релаксации колебательно-возбужденных молекул HF(v) на молекулах N₂. Видно, что результаты расчётов № 2 и 3 практически совпадают, что свидетельствует о незначительной роли этого фактора.

Для оценки роли газодинамических условий смешения реагентов (различия скоростей истечения из сопел струй чистого водорода и водорода, разбавленного азотом) был проведен расчёт № 4. При этом скорость истечения из сопла смеси водорода с азотом полагалась равной скорости истечения из сопла чистого водорода. Из табл. 1 видно, что значения удельных энергетических характеристик HF-НХЛ значительно возросли по сравнению с их значениями по результатам расчётов № 2.

Чтобы понять причины столь сильного влияния скорости истечения струй вторичного горючего на энергетику лазера, следует обратиться к результатам расчёта продольного распределения среднерасходной температуры активной среды T_m в лазерной камере (рис. 4). Видно, что при использовании в качестве вторичного горючего смеси H₂ + N₂ при $T = 300$ К (кривая 2) температура T_m значительно превышает температуру в случае той же смеси, но при идентичных газодинамических параметрах вторичного горючего и окислительного газа (кривая 3). Хорошо известно [12], что рост температуры активной среды приводит к ухудшению энергетики НХЛ. Следовательно, снижение удельных энергетических характеристик HF-лазера при добавлении азота к водороду связано, в первую очередь, с резким повышением температуры в зоне смешения, обусловленным усилением роли вязкой диссипации механической энергии газового потока при увеличении разности скоростей смешивающихся сверхзвуковых струй окислительного газа и вторичного горючего.

Третий из перечисленных выше факторов также играет немаловажную роль в снижении удельной энергетики HF-лазера. Это следует из анализа кривых выгорания атомарного фтора в лазерной камере (рис. 5). Скорость выгорания фтора для расчёта № 1 с использованием чистого водорода (кривая 1) оказалась наибольшей. При добавлении азота скорость выгорания атомов фтора снижается (кривая 2), несмотря на рост среднерасходной температуры активной среды T_m (см. рис. 4, кривая 2). Это обстоятельство однозначно свидетельствует о том, что увеличение молекулярной массы вторичного горючего при добавлении азота в струю водорода приводит к сниже-

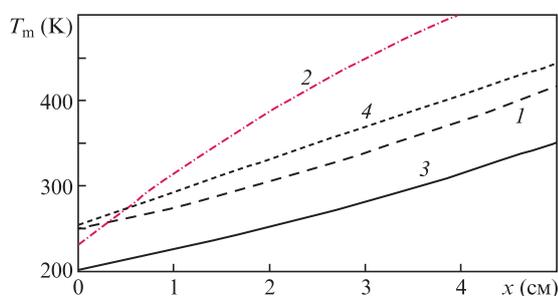


Рис. 4. Продольные распределения среднерасходной температуры активной среды в лазерной камере при использовании в качестве вторичного горючего H₂ (1), смеси H₂ + N₂ при температуре 300 К (2), смеси H₂ + N₂ при равных скоростях истечения из сопла струй вторичного горючего и окислительного газа (3) и смеси H₂ + N₂ при температуре 1000 К (4); x – расстояние от выходного сечения соплового блока.

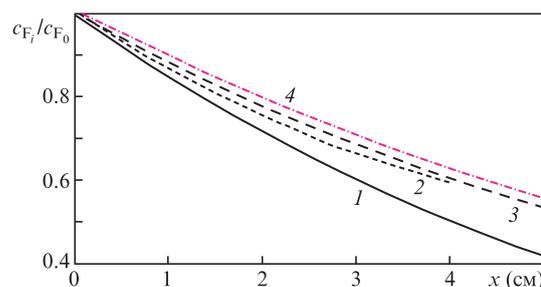
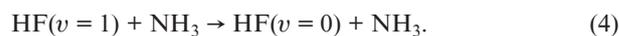
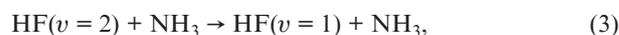


Рис. 5. Зависимости от расстояния x выгорания фтора в лазерной камере при использовании в качестве вторичного горючего H₂ (1), смеси H₂ + N₂ при температуре 300 К (2), смеси H₂ + N₂ при равных скоростях истечения из сопла струй вторичного горючего и окислительного газа (3) и смеси H₂ + N₂ при температуре 1000 К (4); c_{Fi} – массовая доля атомарного фтора в i -м сечении лазерной камеры; c_{F0} – массовая доля атомарного фтора в выходном сечении соплового блока.

нию интенсивности её смешения со струёй окислительного газа, к снижению скорости наработки колебательно-возбужденных молекул HF(v) и к падению удельных энергетических характеристик лазера.

Наиболее вероятными причинами резкой зависимости удельных энергетических характеристик HF-лазера от содержания аммиака в струе вторичного горючего (см. рис. 3) могут являться VT-релаксация колебательно-возбужденных молекул HF(v) на молекулах NH₃ или продуктах его взаимодействия с фтором, которые, возможно, образуются при смешении струй вторичного горючего и окислительного газа в лазерной камере, а также объемное поглощение ими излучения HF-лазера.

Роль указанных факторов подтверждается анализом спектров излучения, измеренных в ходе экспериментов. По спектрограммам идентифицировано восемь переходов (индексы указывают на нижний уровень перехода): P₀(9–12) полосы $v = 1 \rightarrow 0$ и P₁(8–11) полосы $v = 2 \rightarrow 1$ в диапазоне $\lambda = 2.82–3.04$ мкм. По мере увеличения содержания аммиака в составе активной среды отчетливо наблюдаются две тенденции, а именно: интенсивная «перекладка» мощности из колебательной полосы $v = 2 \rightarrow 1$ в полосу $v = 1 \rightarrow 0$ и резкое снижение мощности излучения лазера практически без изменения общих границ спектра. Можно предположить, что указанные процессы обусловлены, с одной стороны, VT-релаксацией колебательно-возбужденных молекул HF(v) на молекулах NH₃:



С ростом концентрации аммиака VT-релаксация интенсифицируется, причём процесс (3), по-видимому, является преобладающим, что и обеспечивает перераспределение мощности между полосами за счёт усиления инверсии на переходах полосы $v = 1 \rightarrow 0$.

С другой стороны, существенное влияние на величину излучаемой мощности может оказывать объемное поглощение излучения лазера молекулами аммиака. Проверка этого предположения осуществлялась следующим образом. Нашими экспериментами было установлено, что наличие в составе активной среды NH₃ в количестве более 8% по объёму приводит к полному срыву генерации лазера (см. рис. 3). Если этот эффект вызван объемным погло-

щением излучения, то он будет иметь место в присутствии аммиака не только в составе активной среды, но и вне её, например на пути прохождения лазерного пучка к измерителю мощности излучения. Последний вариант был реализован в специальных экспериментах при работе HF-лазера в отсутствие примесей (на чистом водороде), но с продувкой тубусов зеркал резонатора смесью $N_2 + 8\% NH_3$ по объёму. Результаты этих экспериментов подтвердили наличие поглощения излучения HF-лазера аммиаком, особенно линий $P_1(8-10)$, что неудивительно, поскольку эти линии входят в спектр поглощения молекулы NH_3 [13]. Что касается объёмного поглощения излучения HF-лазера молекулами азота, то оно маловероятно, поскольку генерируемые линии в спектр поглощения молекулы N_2 не попадают [13].

Смесь азота и водорода, полученную в результате каталитического разложения гидразина, отличается довольно высокой (1000 К и выше) температурой. При подготовке модельных смесей это обстоятельство ввиду технических трудностей, связанных с предварительным разогревом водорода, не учитывалось. Поэтому интересна расчетная оценка влияния на удельные энергетические характеристики HF-лазера температуры торможения струи вторичного горючего (смесь азота с водородом). Для получения такой оценки был выполнен расчёт № 5. В нем, в отличие от расчёта № 2, температура вторичного горючего полагалась равной 1000 К, близкой к реальной температуре продуктов разложения гидразина. Оказалось, что скорость истечения струи вторичного горючего увеличилась в 1.8 раза. Это привело к уменьшению разности скоростей истечения струй вторичного горючего и окислительного газа, а следовательно, к понижению среднерасходной температуры активной среды T_m (см. рис. 4, кривая 4), которое имеет место, несмотря на повышение температуры вторичного горючего на срезе соплового блока. Указанное обстоятельство весьма благоприятно сказывается на удельных энергетических характеристиках HF-НХЛ и приближает их на 13% к соответствующим характеристикам лазера, работающего с использованием чистого водорода, но при отсутствии аммиака.

5. Заключение

Результаты выполненного исследования показали принципиальную возможность использования в сверхзвуковом HF-лазере продуктов разложения гидразина в качестве вторичного горючего. При работе на холодных ($T = 300$ К) модельных смесях установлено, что добавка в состав вторичного горючего азота в количестве 30%–35% по объёму, соответствующем его содержанию в продуктах разложения гидразина, снижает удельную мощность N_F на 33%, а удельный энергосъём N_Σ – на 43% от уровня, полученного при использовании чистого водорода в оптимальном режиме работы исследованной модели HF-ла-

зера. Учёт реального разогрева продуктов до 1000 К в ходе каталитического разложения гидразина позволяет приблизить уровень удельной энергетики лазера к уровню, достигаемому при его работе на чистом водороде на 13%, что приведёт к снижению удельного энергосъёма только на 30% при отсутствии в составе продуктов разложения NH_3 . Если же сопловой блок HF-лазера специально адаптировать для работы с использованием в качестве вторичного горючего продуктов каталитического разложения N_2H_4 с учётом необходимости выравнивания скоростей струй вторичного горючего и окислительного газа, то эта цифра может быть ещё уменьшена.

Для практической реализации жидкостного генератора водорода на основе каталитического разложения гидразина необходимо исключить из состава продуктов его разложения аммиак. Решение этой задачи предполагает создание специальных реакторов, катализаторов и каталитических пакетов, тщательную конструкторскую проработку и организацию теплового режима процесса разложения, а также использование химических поглотителей аммиака. Все эти меры требуют экспериментальной отработки [14].

Автор считает своим долгом выразить благодарность В.К.Робонэ, Н.Е.Третьякову, М.Х.Стрельцу и М.Л.Шуру за помощь в проведении экспериментов, измерении спектров и выполнении численных расчётов.

1. Карельский В.Г., Пирогов Н.А., Смирнов В.Е. *Труды НПО Энергомаши им. В.П.Глушко*, № 18, 361 (2000).
2. Башкин А.С., Гуров Л.В., Каторгин Б.И., Петрова С.Н., Полиновский Д.В. *Труды НПО Энергомаши им. В.П.Глушко*, № 25, 395 (2007).
3. Башкин А.С., Парфеньев М.В., Семенов С.Н. *Труды НПО Энергомаши им. В.П.Глушко*, № 24, 344 (2006).
4. Huskins C.W., Patrick R.E. Патент 3940474 США, МКИ С01В 3/00, С01В 3/04. Оpubл. 24.02.1976. Заявка № 23602499 от 06.08.1974.
5. Martignoni P., Chew W.M., Ayers O.E., Murfree J.A. Патент 4157270 США, МКИ С09К 3/00, С06С 9/00. Оpubл. 05.06.1979. Заявка № 25262420 от 12.09.1977.
6. Channell R.E., O'Pray J.E. Патент 4021362 США, МКИ С01В 4/00, Н01S 3/095. Оpubл. 03.05.1977. Заявка № 27065586 от 01.07.1975.
7. Зрелов В.Н., Серегин Е.П. *Жидкие ракетные топлива* (М.: Химия, 1975).
8. Коровин Н.В. *Гидразин* (М.: Химия, 1980).
9. Фёдоров И.А. *Квантовая электроника*, **49**, 735 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 735 (2019)].
10. Фёдоров И.А. *Непрерывные химические лазеры на рабочих молекулах фтористого водорода и фтористого дейтерия* (С.-Пб.: Изд-во Балтийского гос. техн. ун-та, 1994, кн.2).
11. Лавров А.В., Поспелов В.А., Федотов А.В., Шур М.Л. *Физика горения и взрыва*, **15**, 89 (1979).
12. *Химические лазеры*. Под ред. Р.Гросса и Дж.Ботта (М.: Мир, 1980).
13. Анашин А.Н., Гастилович Е.А., Клименко В.Т. *Колебательные спектры многоатомных молекул* (М.: Наука, 1986).
14. *Физико-химические аспекты предельных состояний и структурных превращений в сплошных средах, материалах и технических системах*. Под ред. Ю.В.Петрова (С.-Пб.: Политехника, 2017, вып.1).