

Численное моделирование высокоэффективного HF-лазера с накачкой от сгорания предварительно нагретых компонентов топлива*

Сяотин Фан, Шенфу Юань, Вейхун Хуа

Проведен модельный расчет процессов, происходящих в сопловой решетке и оптическом резонаторе химического HF-лазера непрерывного действия с накачкой от сгорания предварительно нагретого топлива. Результаты исследования показали, что нагрев топлива может радикально улучшить выходные характеристики таких лазеров. Достижимые мощность и удельная мощность были увеличены на ~13% и ~46% соответственно при предварительном нагреве топлива до 1200 К. Одновременно расход топлива в камере сгорания снизился на ~36%, что позволяет улучшить рабочие характеристики химических HF-лазеров с тепловой накачкой и сделать их более компактными за счет предварительного нагрева топлива.

Ключевые слова: химические лазеры, лазеры с тепловой накачкой, предварительный нагрев топлива, компактность, моделирование.

1. Введение

История химических HF/DF-лазеров насчитывает примерно 50 лет. Эти лазеры использовались на платформах наземного базирования [1–3], рассматривалась также возможность их космического базирования [4–7]. Хорошо известно, что дальнейшее развитие химических DF/HF-лазеров непрерывного действия (continuous-wave chemical lasers (DF/HF-CWCL)) с тепловой накачкой сдерживается их принципиально большим объемом, что связано, прежде всего, с применением огромных газовых эжекторов и большим объемом системы хранения топлива. Эффективным способом уменьшения объема газовых эжекторов является увеличение давления в оптическом резонаторе, т.е. увеличение полного давления в камере сгорания [8–10]. Однако эффективных способов уменьшить объем системы хранения топлива найдено не было.

В 1975 г. экспериментальное исследование, направленное на улучшение рабочих характеристик DF/HF-CWCL путем предварительного нагрева топлива было проведено в Лаборатории вооружения военно-воздушных сил США (Air Force Weapons Laboratory) [11]. В химическом HF-лазере с топливной смесью (D_2-F_2-He)- H_2 перед попаданием в камеру сгорания газ-разбавитель He нагревался электрическим током от комнатной температуры до 810 К для компенсации расходов D_2 и F_2 , требуемых для поддержания такой же степени диссоциации фтора и такого же потока фтора в резонатор, как и в отсутствие нагрева. Экспериментальные результаты показали, что пиковая мощность лазера увеличивалась на ~15%

по сравнению с таковой при комнатной температуре благодаря уменьшению на ~22% количества DF (сильнейшего дезактиватора) в оптическом резонаторе, что означает меньший расход топлива при той же выходной мощности лазера.

Это исследование инициировало создание более компактных DF/HF-CWCL за счет уменьшения количества топлива посредством его предварительного нагрева, особенно после успешного решения проблемы быстрой абляции горловин сопел в процессе длительной работы при высоком полном давлении в камере сгорания [12–14].

Наша исследовательская группа занимается изучением нового типа DF/HF-CWCL, которые являются более компактными и имеют лучшие рабочие характеристики. На первой стадии предварительный нагрев топлива изучался теоретически с целью анализа его потенциальных возможностей для компактных DF/HF-CWCL [10]. Результаты расчетов показывают, что при предварительном нагреве топлива до 1300 К требуемая полная масса топливных компонентов уменьшается на ~43%, а удельная мощность возрастает на ~74.2%.

Однако только теоретические расчеты не могут обеспечить достаточной информации для инженерного проектирования компактного DF/HF-CWCL с предварительным нагревом топлива, а экспериментальные исследования слишком дороги. Поэтому перед выполнением экспериментов желательно провести соответствующие исследования путем численного моделирования.

В настоящей работе для исследования характеристик HF-CWCL с предварительным нагревом топлива мы использовали вычислительную программу CHMBER and RANDON (C-R) [15, 16]. Были рассчитаны усиление слабого сигнала и распределение интенсивности излучения в оптическом резонаторе, выходная мощность, удельная выходная мощность и химическая эффективность лазеров при различных температурах предварительного нагрева. Данное численное моделирование является существенной частью программы наших исследований, и в настоящей работе представлены важные промежуточные результаты, которые составят теоретическую основу

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

Xiaoting Fang, Shengfu Yuan, Weihong Hua. National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, China;
e-mail: fangxiaotingmao@163.com, shengfuyuan_bb@163.com, huaawj@163.com

Поступила в редакцию 3 декабря 2016 г., после доработки – 13 января 2017 г.

экспериментальных исследований на следующей стадии. Поэтому все режимы работы лазера и его параметры в численных экспериментах задавались в соответствии с будущими натурными экспериментами, чтобы обеспечить адекватное сравнение их результатов.

2. Схема расчетов

Объектом нашего исследования является HF-CWCL с топливной смесью $(D_2-NF_3-He)-H_2$ и соплами длиной 2.1 мм и шириной 0.076 мм [17]. Предполагается, что исходные концентрации реагентов находятся в соотношении $n_{D_2}:n_{NF_3}:n_{He} = 1:1.003:5.683$. Коэффициент α избытка NF_3 составляет 1.55 [10], а первичный коэффициент разбавления $\Psi_p = 10.34$ [10]. Оптическая длина пути в резонаторе считается равной 100 см, а коэффициенты поглощения $(a_{1,2})$ и отражения $(r_{1,2})$ глухого (a_1, r_1) и выходного (a_2, r_2) зеркал были выбраны следующими: $a_1 = 0$, $r_1 = 1$ и $a_2 = 0.02$, $r_2 = 0.85$. С учетом того что NF_3 легко диссоциирует при высокой температуре, в расчетах температура предварительного нагрева NF_3 составляла 300–550 К, в то время как для D_2 и He она бралась в пределах 300–1200 К. Начальная температура вторичного топлива H_2 и стенок топливных сопел предполагалась равной 300 К. Начальное полное давление в камере сгорания составляло 0.9 бар, а давление торможения H_2 полагалось равным 0.6 бар. Процесс моделирования описан ниже.

На первой стадии, согласно методу из [10], вычислялось новое соотношение концентраций компонентов топлива, предварительно нагретых до различных высоких температур t . Затем с помощью программы для расчета сложных химических равновесных составов CEA (Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions) [18] были получены начальные равновесные выходные параметры смеси в камере сгорания (массовая доля $\delta_i^{(t)}$ равновесных i -х компонентов, общая температура T_0 , полное давление p_0 , показатель адиабаты γ и молекулярный вес w смеси) при предварительном нагреве компонентов топлива до различных высоких температур. Расход $\dot{m}_i^{(t)}$ равновесных компонентов ($i = DF, F, F_2, N_2, He$) при различных температурах предварительного нагрева t можно рассчитать по формуле

$$\dot{m}_i^{(t)} = \delta_i^{(t)} \left\{ c \frac{p_0 A^*}{\sqrt{RT_0/w}} \left[\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)(\gamma-1)/2} \right]^{1/2} \right\}, \quad (1)$$

где c – коэффициент массового расхода; A^* – площадь горловины сопла; $R = 8.314$ Дж·моль⁻¹·К⁻¹ – газовая постоянная.

На второй стадии моделирования для получения при различных температурах предварительного нагрева такого же расхода атомов F на выходе из камеры сгорания, как и при комнатной температуре, вместо P_0 использовалось давление

$$p_0^{(t)} = p_0 \frac{\delta_F^{(t)}}{\delta_F^{300K}}, \quad (2)$$

чтобы обеспечить равенство $\dot{m}_F^{(t)} = \dot{m}_F^{300K}$, тогда как другие параметры в (1) оставались неизменными. Затем новые равновесные выходные параметры в камере сгорания (при полном давлении $p_0^{(t)}$) при различных температурах

предварительного нагрева рассчитывались с помощью программы CEA.

При новом молекулярном соотношении концентраций компонентов топлива первоначальный коэффициент разбавления Ψ_p постепенно уменьшался с увеличением температуры предварительного нагрева. Для поддержания неизменным коэффициента Ψ_p с целью минимизировать его влияние на лазерную среду в оптическом резонаторе можно использовать дополнительное количество основного разбавителя He, который может служить охлаждающей пленкой [12] на горловинах сопел для предотвращения их накапливающейся абляции. В расчетах полагалось, что добавление He в топливную смесь равновесного состава проводилось непосредственно в камере сгорания, поскольку в рассматриваемой двумерной модельной структуре отсутствовали щели, создающие охлаждающую пленку.

На третьей стадии моделирования с помощью программы C-R независимо рассчитывались потоки для сопел окислителя и вторичного топлива, а также оптического резонатора.

3. Результаты моделирования

Ниже приведены основные результаты наших расчетов. Исходным условием при расчетах было постоянство массового расхода атомов F, создаваемых в камере сгорания, и первичного коэффициента разбавления при повышении температуры предварительного нагрева.

Основные параметры газа в камере сгорания представлены на рис.1. Видно, что с увеличением температуры предварительного нагрева от 300 до 1200 К коэффициент избытка NF_3 увеличился от 1.55 до 2.07 благодаря росту концентрации n_{NF_3} , а полный массовый расход топлива в камере сгорания, необходимый для создания такого же количества атомов F, уменьшился на ~36%, что весьма благоприятно для повышения удельной выходной мощности лазеров.

Из рис.2 видно, что пиковое значение полной интенсивности излучения внутри резонатора немного увеличивается (на ~2.8% при $t = 1200$ К по сравнению с таковым при $t = 300$ К) с увеличением температуры предварительного нагрева, а длина активной лазерной зоны (~2 см) почти не изменяется: эта зона начинается на расстоянии $x \approx 0.22$ см от выходной плоскости линейки сопел и продолжается до $x \approx 2.25$ см.

Из рис.3 видно, что выходная мощность растет с ростом температуры предварительного нагрева, причем при

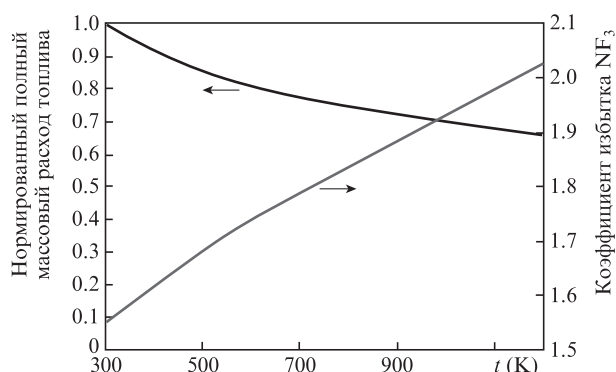


Рис.1. Зависимости основных рабочих параметров газа в камере сгорания от температуры предварительного нагрева t .

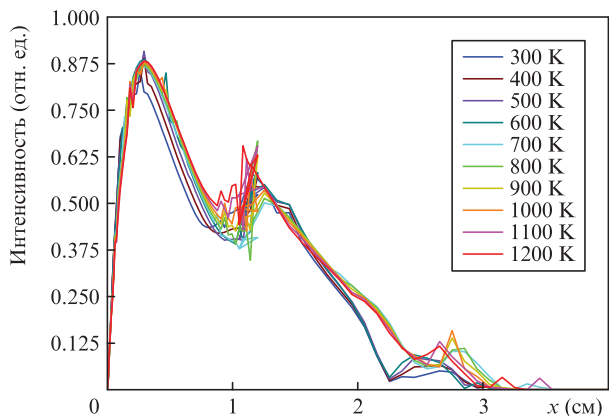


Рис.2. Зависимости полной интенсивности излучения в резонаторе от расстояния x до выходной плоскости сопел при различных температурах предварительного нагрева t . Цветные варианты рис.2–8 помещены на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

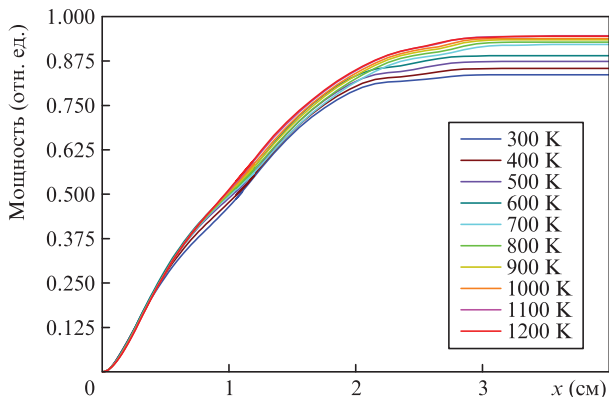


Рис.3. Зависимости выходной мощности от расстояния x при различных температурах предварительного нагрева t .

увеличении температуры от 300 до 1200 К этот рост составляет $\sim 13\%$. Увеличение удельной выходной мощности на $\sim 46\%$ при увеличении температуры предварительного нагрева топлива в тех же пределах демонстрирует рис.4. Это означает, что необходимо намного меньше топлива в камере сгорания для генерации такой же выходной лазерной мощности.

Выходные характеристики исследуемого HF-лазера были получены при условии неизменного количества атомов F, создаваемых в камере сгорания при различных температурах предварительного нагрева топлива. Воз-

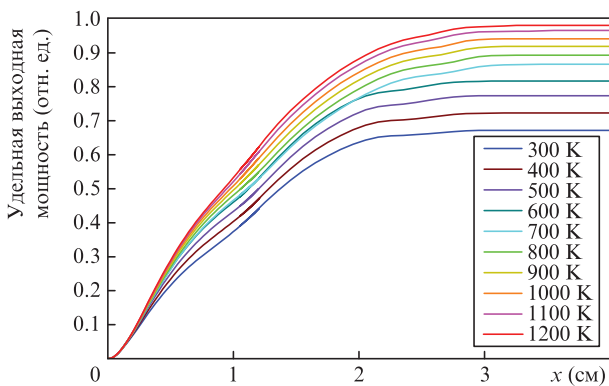


Рис.4. Зависимости удельной выходной мощности от расстояния x при различных температурах предварительного нагрева t .

можными причинами увеличения выходной и удельной выходной мощностей являются следующие.

Прежде всего, продольные (по координате x) распределения коэффициента усиления слабого сигнала g в резонаторе имели тенденцию к росту при увеличении температуры предварительного нагрева. Это видно из рис.5, где пиковые значения g увеличивались на $\sim 47.5\%$, $\sim 66.1\%$ и 174% для переходов $v = 1 \rightarrow v = 0$, $v = 2 \rightarrow v = 1$ и $v = 3 \rightarrow v = 2$ молекулы HF соответственно. Длина активной лазерной зоны, полученная из продольных распределений коэффициента g , составила около 1.9 см. Она занимает область от ~ 0.29 до ~ 2.2 см от выходной плоскости линейки сопел, что почти согласуется с данными рис.2.

Во-вторых, массовая доля наиболее сильного дезактиватора возбужденных молекул HF(v) – молекулярного DF –

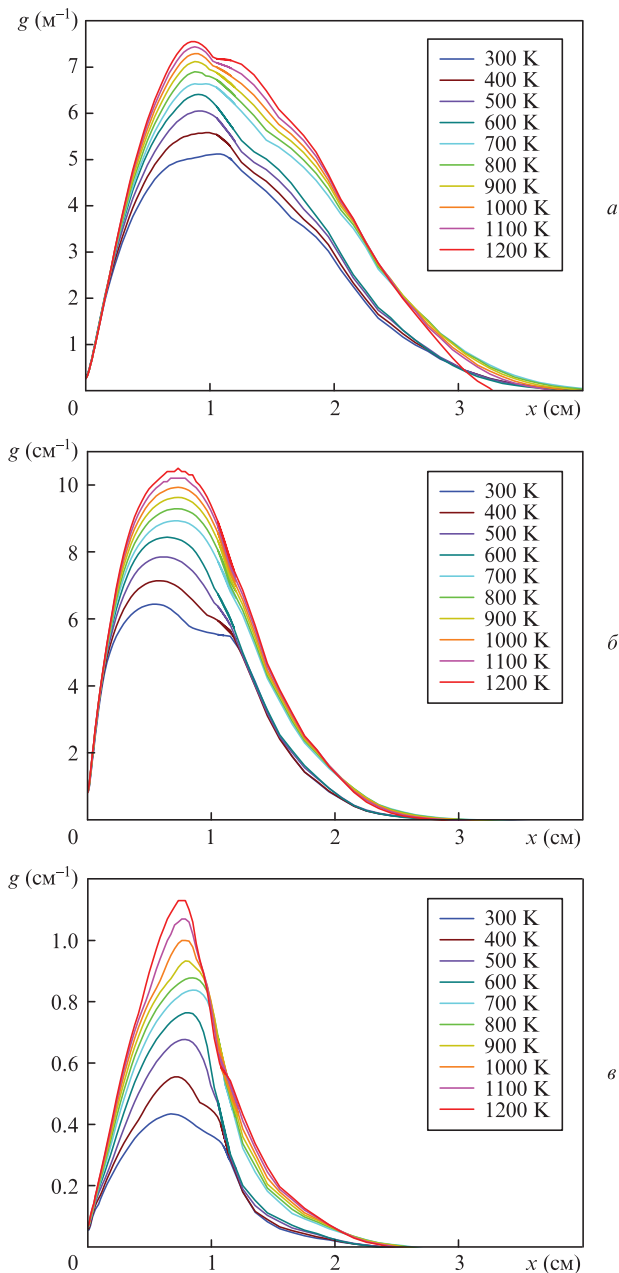


Рис.5. Продольные распределения коэффициента усиления слабого сигнала g в резонаторе при различных температурах предварительного нагрева t для переходов $v = 1 \rightarrow v = 0$ (а), $v = 2 \rightarrow v = 1$ (б) и $v = 3 \rightarrow v = 2$ (в).

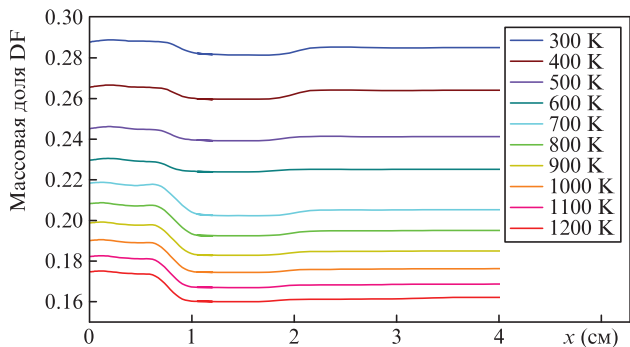


Рис.6. Продольные распределения массовой доли DF при различных температурах предварительного нагрева t .

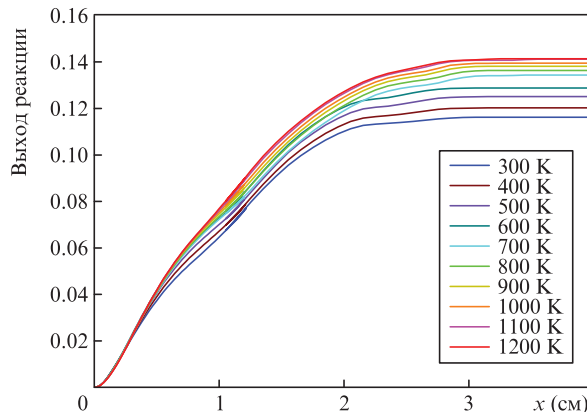


Рис.8. Выход химической реакции при различных температурах предварительного нагрева t .

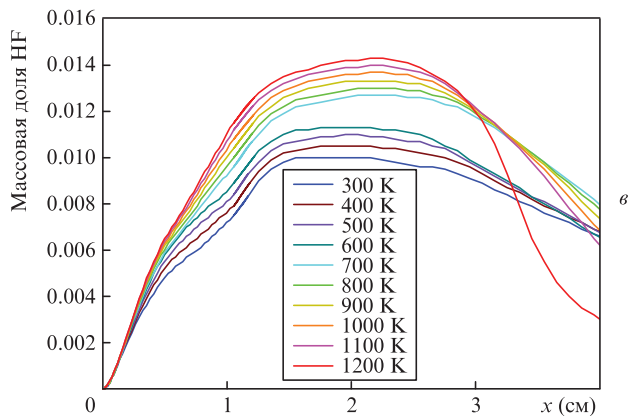
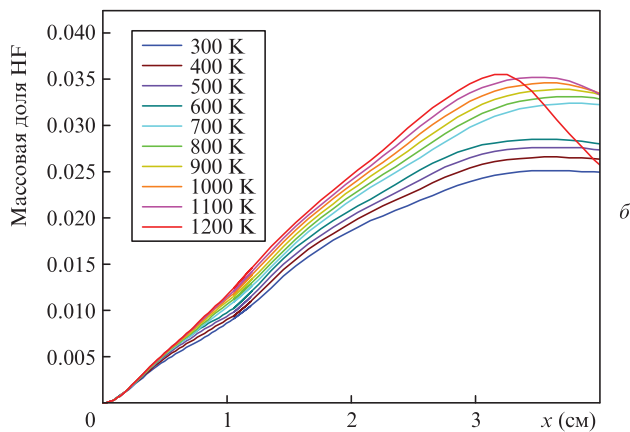
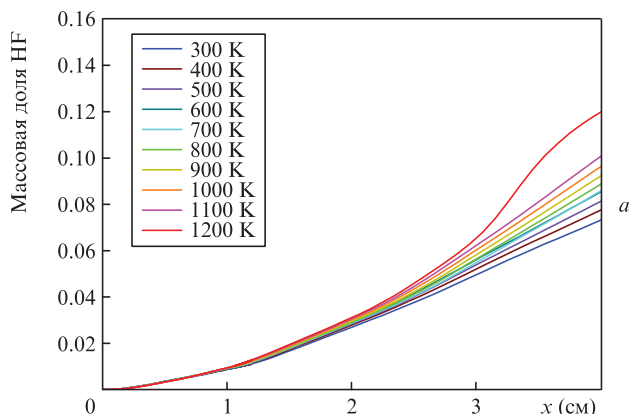


Рис.7. Продольные распределения массовой доли возбужденных молекул HF($v = 1$) (а), HF($v = 2$) (б) и HF($v = 3$) (в) при различных температурах предварительного нагрева t .

в оптическом резонаторе существенно уменьшается с ростом температуры предварительного нагрева: от 0.2858 при $t = 300$ K до 0.1621 при $t = 1200$ K, т.е. на $\sim 43.3\%$ (рис.6). Это приводит к ослаблению эффективности дезактивации.

В-третьих, массовая доля возбужденных молекул HF(v) очень сильно увеличивалась с ростом температуры предварительного нагрева (рис.7). Пиковые значения массовых долей HF($v = 1$), HF($v = 2$) и HF($v = 3$) увеличивались примерно на 33%, 44% и 15% соответственно, когда топливо предварительно нагревалось до 1200 K, что весьма благоприятно для повышения выходной мощности лазера.

Химическая эффективность (выход химической реакции) лазера зависит от температуры предварительного нагрева следующим образом: она существенно увеличивается от $\sim 10\%$ при $t = 300$ K до $\sim 15\%$ при $t = 1200$ K, что показывает вполне удовлетворительный рост на 50% (рис.8).

4. Обсуждение

Для предварительного нагрева топлива существуют два реальных метода: электрический нагрев и использование предкамеры сгорания.

При электрическом нагреве в качестве аккумулятора теплоты используется змеевик, нагреваемый электрическим током малой мощности в течение длительного времени. Во время работы лазера компоненты топлива, подлежащие предварительному нагреву, проходят через змеевик, забирая накопленную в нем теплоту и нагреваясь до желаемой температуры.

Тестирование электрического способа нагрева показало, что нержавеющая сталь марки 310s выдерживает высокую температуру (до 1300 K) и может использоваться для предварительного нагрева топлива. Можно рассчитать количество теплоты Q , запасенное в змеевике массой $m = 100$ кг, изготовленном из нержавеющей стали (310s): $Q = Cm\Delta t = 0.5 \times 100 \times 10^3 \times 1000 \text{ K} = 5 \times 10^7 \text{ Дж}$, где $C = 0.5 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – удельная теплоемкость стали 310s, а $\Delta t = 1000 \text{ K}$ – изменение температуры накопителя теплоты при его нагреве. Предполагается, что температура змеевика уменьшается от 1300 до 1200 K при передаче количества теплоты $\sim 5 \times 10^6 \text{ Дж}$ нагреваемому лазерному топливу, что оказывается достаточным для его предварительного нагрева до желаемой температуры.

Однако накопление достаточного количества тепла в змеевике занимает много времени, тогда как передача тепла предварительно нагреваемому топливу происходит очень быстро, поскольку скорость потока топлива велика. Поэтому электрический нагрев выгоден при кратковременной работе лазера и не годится для работы в течение длительного времени.

Для продолжительной работы подходит способ с использованием предкамеры сгорания. В этой камере дополнительное топливо (этилен, этиловый спирт и т.п.) сгорает в окислителе (кислороде, экстрагированном из сжатого воздуха), создавая высокую температуру. Трубки, по которым подается лазерное топливо, проходят через такую камеру, нагреваясь горячим газом до необходимой температуры. Затем предварительно нагретые компоненты лазерного топлива попадают в камеру сгорания лазера. После эксперимента газ из предкамеры сгорания может выпускаться прямо в атмосферу, при этом эжекторный насос не нужен, что способствует компактности лазера.

По сравнению с массой лазерного топлива, сэкономленного за счет его предварительного нагрева (~36%), и уменьшением соответствующих массы и объема отработанных газов, стоимость, объем и вес системы предварительного нагрева топлива любым из описанных методов совсем невелики. Таким образом, предварительный нагрев топлива может внести существенный вклад в повышение компактности и в улучшение рабочих характеристик DF/HF-CWCL. Теоретическое доказательство этого являлось целью проведенного в настоящей работе численного моделирования. Оно призвано обеспечить достаточную информацию для последующего инженерного проектирования и экспериментальной реализации лазера.

DF/HF-CWCL с предварительным нагревом топлива создается на базе существующего DF/HF-лазера небольшого размера с накачкой от сгорания топлива. В настоящее время мы подаем заявку на патент, касающийся методов предварительного нагрева топлива. Более подробное описание этих методов станет доступным читателю после публикации патента.

5. Заключение

Подводя итог нашему исследованию, можно сделать следующие выводы относительно влияния температуры

предварительного нагрева на выходные параметры химического HF-лазера с накачкой от сгорания топлива.

Показано, что предварительный нагрев топлива может улучшить выходные характеристики химических HF-лазеров с тепловой накачкой. При нагреве топлива до 1200 К выходная мощность и удельная выходная мощность увеличивались на ~13% и ~46% соответственно. Одновременно расход топлива в камере сгорания снижался на ~36%, что позволяет улучшить эксплуатационные характеристики HF-лазеров и сделать их более компактными за счет предварительного нагрева топлива.

Дальнейшие экспериментальные исследования влияния предварительного нагрева топлива на рабочие характеристики HF-лазеров с тепловой накачкой будут выполнены в ближайшем будущем.

1. Wachs J.J., Wilson G.T. *Opt. Eng.*, **52** (2), 021009 (2012).
2. Shwartz J., Wilson G.T., Avidor J.M. *Proc. SPIE*, **4632**, 10 (2002).
3. Lavan M.J., Wachs J.J. *Proc. SPIE*, **8187**, 818704 (2011).
4. Horkovich J.A., Pomphrey P.I. *AIAA Preprint №97-2409* (1997).
5. Ackerman R., Callahan D., Cordi A., et al. *Proc. SPIE*, **2502**, 358 (1994).
6. Cordi A., Lune H., Callahan D., Thomson M. *Proc. SPIE*, **1871**, 110 (1993).
7. Авдеев А.В., Башкин А.С., Каторгин Б.И., Парфеньев М.В. *Квантовая электроника*, **41** (7), 669 (2011).
8. Башкин А.С., Гузов Л.В., Курдюков М.В. *Квантовая электроника*, **41** (8), 697 (2011).
9. Башкин А.С., Парфеньев М.В., Семенов С.Н. *Труды НПО «Энергомаш»*, №24, 344 (2006).
10. Ксяотинг Фанг, Шенгфу Юань, Вейхонг Хуа. *Квантовая электроника*, **46** (9), 790 (2016).
11. Hyde J.C., Hurlock S.C. *Advanced Chemical Laser Nozzle Concept* (Canoga Park, CA: Rockwell International Corp., 1975).
12. Chinese Patent, 2015105296444 (2016).
13. Huang Bing. *Experimental Study on New Ignition System and Gain Generator with Gaseous Film Cooling for Combustion-driven HF/DF Lasers* (Changsha, NUDT, 2014).
14. Xiaoting Fang, Shengfu Yuan, Weihong Hua. *Chin. Opt. Lett.*, **13** (3), 033101 (2015).
15. Egorov Y., Kuznetsov A., Shur M., et al. *Proc. Eur. Conf. on Computational Fluid Dynamics* (Stuttgart, Germany, 1994, Vol. 1, pp 815–821).
16. Hua Weihong, Jiang Zongfu, Zhao Yijun. *Chin. J. Lasers*, **25** (3), 197 (1998).
17. Hua Weihong. *Numerical Simulation of High Energy Continue Wave DF/HF Chemical Laser* (Changsha, NUDT, 1997).
18. Gordon S., Mcbride B.J. *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications* (NASA Reference Publication, 1994).