

## АКТИВНЫЕ СРЕДЫ

# Анализ возможности создания более компактных DF-лазеров, инициируемых сгоранием топлива за счет его предварительного нагрева\*

Ксяотинг Фанг, Шенгфу Юань, Вейхонг Хуа

*Проведен теоретический расчет процессов в камере сгорания химических лазеров непрерывного действия на DF/HF, инициируемых сгоранием, с различным составом топлива, компоненты которого предварительно нагревались до высоких температур. Результаты расчетов демонстрируют сильное влияние предварительного нагрева на выход атомов F и сильнейшего дезактиватора, на коэффициент первичного разбавления  $\Psi_p$  и на удельную мощность. При предварительном нагреве компонентов топлива до 1300 К удельная мощность возросла примерно на 74.2%, а полная необходимая масса топлива сократилась на 43%, что позволяет надеяться на реализацию более компактных и эффективных конструкций химических лазеров непрерывного действия на DF/HF, работающих при повышенном давлении в камере сгорания. Предварительный нагрев топлива может способствовать прогрессу химических лазеров и созданию не только мощных лазерных систем воздушного или космического базирования, но и аналогичных мобильных систем наземного базирования.*

**Ключевые слова:** химические лазеры, инициация сгоранием, предварительный нагрев топлива, компактность.

## 1. Введение

Химические DF/HF-лазеры непрерывного действия, инициируемые сгоранием топлива, относятся к лазерам высоких энергий [1]. Результатом реализации программ создания DF/HF-лазеров явилось несколько систем мощностью в несколько сотен киловатт или мегаватт, включая системы BDL, NAACL, MIRACL и Alpha [2]. Тактический DF-лазер высокой энергии наземного базирования был системой, наиболее близкой к разработкам военного назначения, которая предназначалась для защиты от ракет, артиллерийских снарядов и мин противника. С помощью этой системы многократно демонстрировалась возможность сбивать атакующие ракеты. Несмотря на отличные показатели по удельной лазерной мощности, программа была свернута в 2006 г. по причине громадных размеров системы. Дальнейшие исследования были сосредоточены на развитии твердотельных лазеров с целью создания компактного и эффективного лазера высокой мощности, однако результаты оказались не вполне удовлетворительными.

В 2011 г. на 42-й конференции AIAA по динамике плазмы и лазерам Д.Л.Кэрролл указал на то, что в связи с серьезными исследованиями лазерных платформ космического базирования следует ожидать возврата к рассмотрению HF- или DF-лазеров, обладающих огромным преимуществом в удельной мощности [1].

Большие габариты мощного лазера определяются двумя факторами – огромным соплом, формирующим газовую струю, и размерами системы хранения топлива. Эффективным методом уменьшения размеров сопла является увеличение давления в резонаторе лазера. Высокое давление активного вещества создает более благоприятные условия для выброса продуктов сгорания в окружающую атмосферу [3], особенно при проектировании DF/HF-лазеров для базирования на воздушных судах, совершающих полеты на высоте 12–18 км [4]. В этом случае увеличение давления в активной среде позволило восстановить статическое давление потока выхлопных газов на выходе диффузора до давления окружающей среды. В результате из конструкции были исключены газовые эжекторы. В 2011 г. А.С.Башкин продемонстрировал теоретическую возможность существенного улучшения генерационных характеристик непрерывного химического лазера на DF с использованием решетки из сопел вместо одного щелевого сопла при формировании активной среды в лазере воздушного базирования на высотах около 8 км с выбросом продуктов сгорания в окружающую атмосферу без газовых эжекторов [3].

В задаче очистки околоземного пространства от космического мусора с помощью лазерной станции космического базирования (ЛСКБ), оборудованной автономным химическим DF/HF-лазером [5], масса компонентов лазерного горючего строго ограничена тем условием, что полная масса ЛСКБ не должна превышать грузоподъемность ракеты-носителя. Поэтому значительное сокращение массы компонентов лазерного топлива сделало бы ЛСКБ более компактной, а возможности ее запуска ракетой-носителем были бы значительно расширены.

Для достижения компактности и улучшения рабочих характеристик химических DF/HF-лазеров, работающих за счет сгорания, предварительный нагрев топливных компонентов был впервые осуществлен в Лаборатории вооружений военно-воздушных сил (Air Force Weapons

\* 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, huawj@163.com

Laboratory) задолго до 1975 г. [6]. В работе [6] разжижающий газ He перед поступлением в камеру сгорания нагревался от комнатной температуры до 810 К. При этом пиковая мощность лазера увеличивалась примерно на 15% по сравнению со случаем комнатной температуры, что означало значительное снижение потребления топлива, необходимого для получения той же выходной мощности.

В настоящей работе эффект, вносимый нагревом компонентов топлива, детально исследован теоретически. Выполнено систематическое теоретическое исследование процессов в камере сгорания химических DF/HF-лазеров непрерывного действия с различными топливными системами при предварительном нагреве компонентов топлива до различных высоких температур, при этом полное давление в камере сгорания устанавливалось на высоком уровне (20 бар), обеспечивавшем благоприятную активную среду высокого давления в оптическом резонаторе с приемлемой длиной усиления. Как показали теоретически расчеты, в результате предварительного нагрева полная масса требуемых топливных компонентов значительно уменьшается, а удельная мощность лазера увеличивается. С использованием предварительного нагрева топливных компонентов можно рассчитывать на создание более компактных и эффективных химических DF/HD-лазеров непрерывного действия.

## 2. Метод расчета

В настоящей работе было проведено две серии расчетов, касающихся предварительного нагрева топлива. В первой серии правильность наших расчетов проверялась путем сравнения результатов с опубликованными экспериментальными данными [6]; при этом использовалась топливная смесь  $(D_2 + F_2 + He) + (H_2 + He^s)$ , где  $(D_2 + F_2 + He)$  – топливо, используемое в камере сгорания, а  $(H_2 + He^s)$  – топливо, используемое в оптическом резонаторе. Целью второй серии расчетов был анализ влияния предварительного нагрева топлива на выходные параметры камеры сгорания.

В структуре классических непрерывных химических лазеров на DF/HF [7] камера сгорания является генератором фтора, в котором атомы фтора получают из фторсодержащих соединений ( $NF_3$  или  $F_2$ ) путем термической диссоциации, после чего вытекают в оптический резонатор через решетку сопел. Рабочий режим камеры сгорания определяет скорость диссоциации  $NF_3$  и выход атомарного фтора, что в свою очередь влияет на лазерную среду в оптическом резонаторе и выходные рабочие характеристики лазера.

На основе уравнения сохранения энергии были рассчитаны процессы, происходящие в камере сгорания химических лазеров непрерывного действия на DF/HF с тепловым инициированием реакции для пяти различных топливных смесей при предварительном нагреве компонентов топлива до различных высоких температур. Из них ниже детально рассматривается только обычно используемая система  $(C_2H_4 + NF_3 + He^p) + (D_2 + He^s)$  [8], в которой  $(C_2H_4 + NF_3 + He^p)$  представляют собой компоненты топлива для камеры сгорания с  $He^p$  в качестве первичного разбавителя, а  $(D_2 + He^s)$  – компоненты топлива в оптическом резонаторе с  $He^s$  в качестве вторичного разбавителя.

Предполагалось, что концентрации исходных реагентов в камере сгорания определяются соотношением

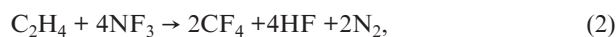
$C_2H_4 : NF_3 : He = 1 : 4\alpha : 6\Psi_p(\alpha - 1)$ , где  $\alpha$  – коэффициент избытка  $NF_3$ , а  $\Psi_p$  – коэффициент первичного разбавления. Компоненты топлива поступают в камеру сгорания нагретыми до температуры  $t_0$ . Внешний приток энергии в камеру сгорания можно рассчитать по формуле

$$Q_0 = (H_{t_0}^o - H_{298.15}^o)_{C_2H_4} + 4\alpha(H_{t_0}^o - H_{298.15}^o)_{NF_3} + 6\Psi_p(\alpha - 1)(H_{t_0}^o - H_{298.15}^o)_{He^p}. \quad (1)$$

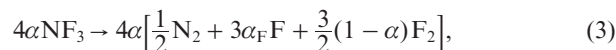
Здесь  $(H_{t_0}^o - H_{298.15}^o)_i$  – изменение энтальпии одного моля  $i$ -го компонента при нагревании от 298.15 К до температуры  $t_0$ , значение которого можно рассчитать с помощью базы данных [9].

В камере сгорания протекают следующие химические реакции:

экзотермическая реакция,



реакция диссоциации,



где  $\alpha_F$  – скорость диссоциации  $NF_3$ .

Тепловой баланс указанных химических реакций определяется уравнениями

$$Q_{exo} = [2\Delta_f H^o(CF_4) + 4\Delta_f H^o(HF) + 2\Delta_f H^o(N_2)] - [\Delta_f H^o(C_2H_4) + 4\Delta_f H^o(NF_3)], \quad (4)$$

$$Q_{dis} = (\alpha - 1)[12\alpha_F \Delta_f H^o(F) + 6(1 - \alpha_F)\Delta_f H^o(F_2) + 2\Delta_f H^o(N_2)] - 4\Delta_f H^o(NF_3). \quad (5)$$

Здесь  $\Delta_f H^o(i)$  – стандартная энтальпия (в кДж/моль) для компонента  $i$ , определяемая по базе данных [9]:

$$\Delta_f H^o(CF_4) = -930; \Delta_f H^o(HF) = -272.55;$$

$$\Delta_f H^o(N_2) = \Delta_f H^o(F_2) = 0; \Delta_f H^o(C_2H_4) = 52.47;$$

$$\Delta_f H^o(NF_3) = -132.09; \Delta_f H^o(F) = 79.39;$$

$Q_{exo} = -2474.31$  кДж/моль (знак «-» означает выделение теплоты);  $Q_{dis} = (\alpha - 1)(952.68\alpha_F + 528.36)$  кДж/моль.

В результате реакций (2), (3) концентрации продуктов достигают равновесных значений при адиабатической температуре  $T_0$ . Количество теплоты, необходимое для нагрева продуктов реакции от комнатной температуры до  $T_0$ , можно рассчитать по формуле

$$Q_{tempup} = 2(H_{T_0}^o - H_{298.15}^o)_{CF_4} + 4(H_{T_0}^o - H_{298.15}^o)_{HF} + 2\alpha \times (H_{T_0}^o - H_{298.15}^o)_{N_2} + 12\alpha_F(\alpha - 1)(H_{T_0}^o - H_{298.15}^o)_F + 6(1 - \alpha_F) \times (\alpha - 1)(H_{T_0}^o - H_{298.15}^o)_{F_2} + 6\Psi_p(\alpha - 1)(H_{T_0}^o - H_{298.15}^o)_{He^p}. \quad (6)$$

Тогда закон сохранения энергии в камере сгорания запишется в виде

$$(1 - \eta_h)Q_{\text{exo}} + Q_0 = Q_{\text{dis}} + Q_{\text{temp up}}, \quad (7)$$

где  $\eta_h$  – коэффициент тепловых потерь из-за переноса тепла между продуктами реакции и стенками камеры сгорания. В наших расчетах предполагалось, что в соответствии с экспериментальными данными [10]  $\eta_h = 0.2$ .

В оптическом резонаторе атомы F и молекулы  $D_2$  являются реагентами для реакции накачки



причем  $D_2$  всегда находится в избытке, чтобы обеспечить полное использование атомов фтора, так что именно атомы фтора, реагирующие почти полностью, и определяют выходную мощность лазеров в соответствии с эмпирической формулой

$$P(\text{кВт}) = \eta_{\text{las}} \times 128 n_F (\text{моль/с}), \quad (9)$$

в которой  $\eta_{\text{las}} = 10\% - 20\%$  (в наших расчетах предполагалось, что  $\eta_{\text{las}} = 10\%$ ), а  $n_i$  – молярная скорость потока  $i$ -го компонента.

Установившиеся выходные параметры камеры сгорания определяют свойства лазерной среды в оптическом резонаторе. Для увеличения выхода атомов фтора при равновесной температуре  $T_0$ , выбранной равной  $\sim 1900$  К (чтобы поддерживать степень диссоциации  $NF_3$  выше 95%), в наших расчетах предполагалось, что вся энергия, вносимая извне в камеру сгорания в результате нагрева компонентов топлива, идет на диссоциацию  $NF_3$  с целью увеличения поступления фтора; при этом  $n_{C_2H_4}$  и  $n_{He}$  остаются неизменными. Итак, в генераторе атомов фтора величины  $P_0$ ,  $T_0$ ,  $\Psi_p$  и  $\alpha_F$  поддерживаются почти постоянными, чтобы не разрушить лазерную среду в оптическом резонаторе, и единственными переменными величинами являются  $n_{NF_3}$  и  $\alpha$ . Ниже все результаты вычислений получены с помощью программ, разработанных нами на основе вышеизложенного расчетного метода.

### 3. Результаты вычислений

#### 3.1. Проверка корректности расчетов

Целью экспериментов в работе [6] было измерение потерь мощности вследствие дезактивации DF. Это осуществляется путем электрического нагрева He, в результате которого скорости потоков  $D_2$  и  $F_2$ , необходимые для получения тех же степени диссоциации фтора и скорости потока фтора в резонатор, снижались. В наших расчетах предполагалось, что химический состав топлива в камере сгорания задается соотношением  $n_{F_2}:n_{D_2}:n_{He} = 0.1647:0.1109:1.265$ , полное давление равно 1.6479 бар и только He подвергается нагреву, что полностью соответствует экспериментальным условиям работы [6]. Основные результаты наших расчетов и данные эксперимента из [6] представлены на рис.1, где нормированное значение  $n_{DF}$  означает отношение количества DF, получаемого с нагретым He, к количеству DF, получаемому с He при комнатной температуре.

Из рис.1 видно, что согласно нашим расчетам  $n_F$  и  $\alpha_F$  остаются почти постоянными, тогда как  $n_{DF}$  уменьшается

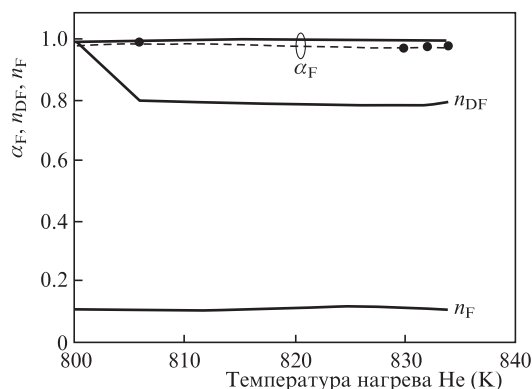


Рис.1. Сравнение основных результатов наших расчетов (сплошные линии) с экспериментальными данными (точки) работы [6];  $n_{DF}$  – нормировано,  $n_F$  измеряется в моль/с.

примерно на 21.5%, если He предварительно нагревается примерно до 800 К. Экспериментальные результаты работы [6], где отмечается спад количества DF на 22%, подтверждают правильность наших расчетов.

#### 3.2. Анализ влияния предварительного нагрева топлива на выходные характеристики DF-лазеров

Для состава топлива ( $C_2H_4 + NF_3 + He^p$ ) + ( $D_2 + He^s$ ) химических DF-лазеров, инициируемых сгоранием, с помощью приведенных выше расчетных формул был выполнен численный анализ равновесных выходных параметров камеры сгорания при различных температурах предварительного нагрева компонентов топлива. На основе расчетов были оценены потенциальные возможности инициируемых сгоранием химических HF/DF-лазеров и получены следующие результаты.

На рис.2 характеризуется исходный состав топлива, поступающего в камеру сгорания, который определялся термодинамическим расчетом при различных температурах предварительного нагрева (см. разд.2). Поскольку  $NF_3$  легко диссоциирует при высокой температуре, в расчетах предварительный нагрев  $NF_3$  ограничивался температурой 550 К, тогда как температуры  $C_2H_4$  и He изменялись от 300 до 1300 К. Предварительные тесты показали, что нержавеющая сталь марки 310s выдерживает нагрев до 1300 К и может использоваться для предварительного нагрева компонентов топлива. Полное давление в камере сгорания составляло 20 бар. Видно, что количество источника фтора ( $NF_3$ ) увеличивается по мере роста температуры предварительного нагрева, тогда как коли-

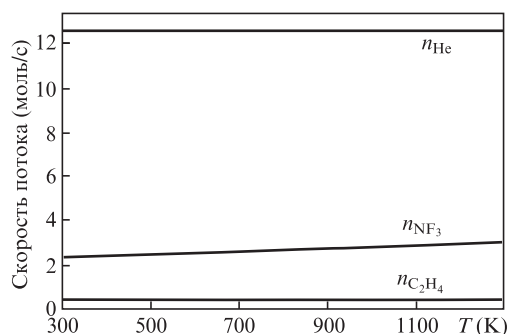


Рис.2. Исходный состав топлива, поступающего в камеру сгорания, при различных температурах предварительного нагрева T.

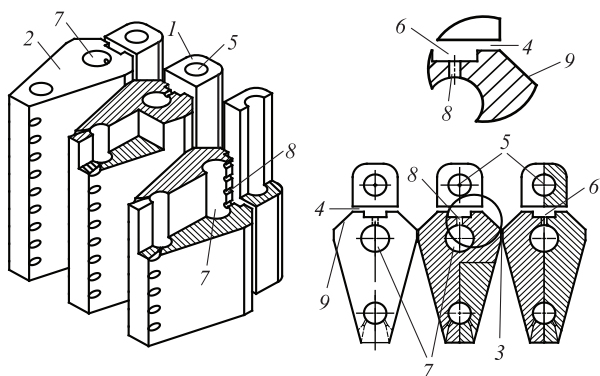


Рис.3. Структура решетки сопел с охлаждающей пленкой: 1 – секция до сужения; 2 – секция горловины и расширения; 3 – горловина; 4 – щель для создания охлаждающей пленки; 5 – канал для охлаждающей воды; 6 – буферная камера; 7 – полость подачи газа в горловину; 8 – микроотверстия; 9 – стенка отклоняющей секции.

чество  $C_2H_4$  и He остается неизменным, что согласуется с результатами разд.2.

Дополнительный гелий используется для создания охлаждающей пленки в горловине сопел, образующих решетку, чтобы предохранить их от абляции. Структура решетки сопел с охлаждающей пленкой, запатентованная нами в [11], показана на рис.3; охлаждающая пленка совершенно необходима, когда лазер работает при большом давлении в камере сгорания, поскольку в этом случае водяное охлаждение само по себе не может защитить горловины сопел от абляционной деформации, наблюдавшейся в контрольных экспериментах.

На рис.4–8 представлены основные результаты наших расчетов, касающиеся параметров топлива на выходе камеры сгорания, полученные путем варьирования температуры предварительного нагрева от 300 до 1300 К. (Термин «нормированный» на рисунках означает отношение указанного параметра при нагреве компонентов топлива к его значению, полученному при комнатной температуре компонентов топлива.) Эти результаты ясно демонстрируют три характерные особенности, вносимые предварительным нагревом компонентов топлива.

Первая особенность (рис.4 и 6) заключается в увеличении выхода атомов F по мере повышения температуры преднагрева  $T$  (рис.4), т.е. полная масса компонентов топлива, необходимая для продуцирования одного моля атомарного фтора, сильно сокращается, примерно на 43% (рис.6), когда температура предварительного нагрева достигает 1300 К.

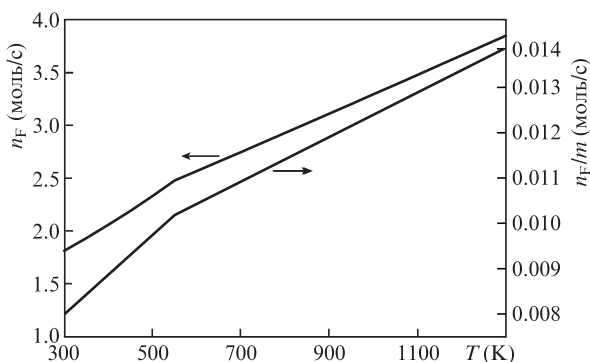


Рис.4. Зависимости  $n_F$  от температуры предварительного нагрева  $T$  ( $m$  – полная масса компонентов топлива).

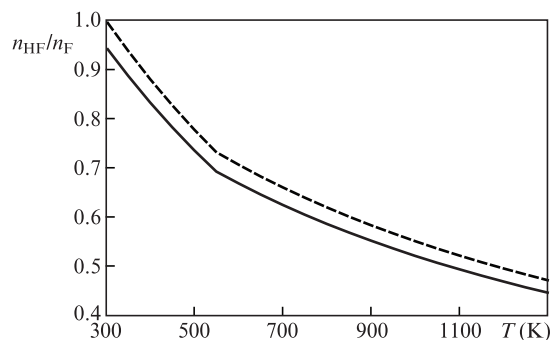


Рис.5. Зависимости  $n_{HF}/n_F$  от температуры  $T$  (штриховая кривая – нормированное отношение).

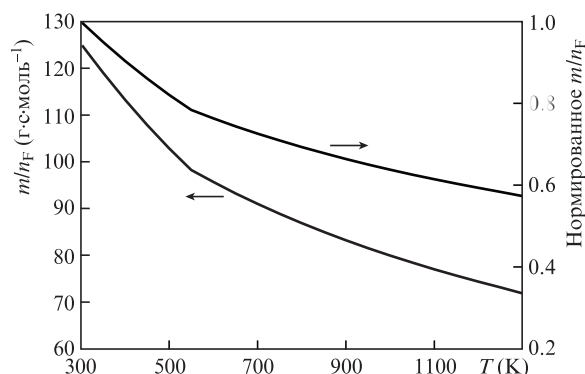


Рис.6. Зависимости  $m/n_F$  от температуры  $T$ .

Вторая особенность состоит в том, что количество сильнейшего дезактиватора (HF), который, согласно скоростному уравнению химической реакции [10], дезактивирует возбужденные молекулы DF со скоростью на три порядка большей, чем все остальные компоненты, чрезвычайно сильно уменьшается (рис.5). При  $T \sim 1300$  К относительная величина  $n_{HF}/n_F$  уменьшается на 53%, что означает ослабление дезактивации и удлинение активной зоны генерации в оптическом резонаторе. И то и другое очень важно для повышения выходной мощности лазера и снижения нагрузки на зеркала резонатора.

Третья особенность очень полезна для химических лазеров с охлаждающей пленкой, инициируемых сгоранием. Простой путь достижения компактности состоит в повышении рабочего давления в камере сгорания. Однако это сопряжено с проблемой быстрой абляции горловины сопел, неприемлемой с точки зрения увеличения срока службы лазера. В наших расчетах рабочее давление в камере сгорания было увеличено до 20 бар, и в рассмотрение была введена охлаждающая пленка, как указано в [11], чтобы избежать абляции горловины сопел. Результаты расчетов показывают, что исходный коэффициент разбавления  $\Psi_p$  по мере роста температуры предварительного нагрева снижался. Поддерживая этот параметр камеры сгорания неизменным и уменьшая до минимума соответствующее влияние на активную среду лазера в оптическом резонаторе, можно использовать экономный разбавитель ( $\Delta Ne$ , рис.7) для создания охлаждающей пленки в горловине каждого сопла решетки, что может предохранить их от абляции и увеличить срок службы лазера.

Выходная удельная мощность лазера (рис.8) оценивалась в соответствии с выражением (9), связывающим выходную мощность с параметром  $n_F$ . Заметим, что удель-



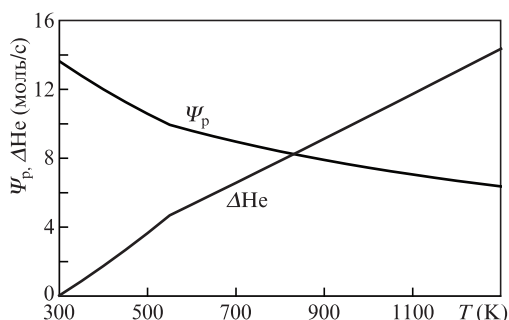


Рис.7. Зависимости исходного коэффициента разбавления  $\Psi_p$  и  $\Delta He$  от температуры  $T$  ( $\Delta He$  – скорость потока He, необходимая для поддержания постоянного значения  $\Psi_p$  в камере сгорания).

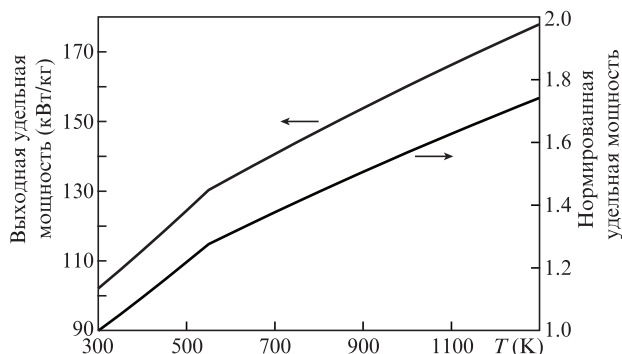


Рис.8. Оцененная удельная выходная мощность лазера при различных температурах  $T$ .

ная мощность лазера имеет тенденцию к росту при увеличении температуры предварительного нагрева, т. к.  $n_F/m$  растет, чтобы поставлять больше необходимых атомов фтора. При температуре предварительного нагрева примерно 800 и 1300 К рассчитанная удельная мощность возросла примерно на 44% и 74.3% соответственно, что является большим шагом вперед по пути достижения компактности химических лазеров, инициируемых сгоранием. Наша исследовательская группа продолжает работать над минипроектом по исследованию влияния предварительного нагрева топлива на выходные характеристики таких лазеров.

#### 4. Выводы

Подводя итог нашего теоретического анализа влияния предварительного нагрева компонентов топлива на характеристические параметры инициируемых сгоранием химических лазеров на HF/DF, можно сделать следующие выводы.

1. Выход атомов F растет с повышением температуры предварительного нагрева топлива. При  $T = 1300$  К пол-

ная масса компонентов топлива, необходимых для производства требуемого количества атомов F, сократилась примерно на 43%, а удельная мощность лазера повысилась примерно на 74.2%. Это очень важно для создания более компактных химических HF/DF-лазеров, инициируемых сгоранием.

2. Выход молекул HF – сильнейшего дезактиватора возбужденных молекул DF – радикально уменьшился с повышением температуры предварительного нагрева топлива, благодаря чему увеличилась длина активной зоны лазерной генерации в оптическом резонаторе. Это важно для повышения выходной мощности лазеров и снижения нагрузки на зеркала резонатора.

3. Начальное значение коэффициента разбавления  $\Psi_p$  имело тенденцию к снижению с ростом температуры предварительного нагрева. Излишек основного разбавителя (атомы He) может быть использован для создания охлаждающей пленки в горловине сопел. Это не только позволит поддерживать выходной параметр  $\Psi_p$  камеры сгорания постоянным, избегая отрицательного влияния его изменения на активную лазерную среду в оптическом резонаторе, но и защитит горловины сопел от абляции, что увеличит продолжительность работы лазера.

Полученные результаты показывают теоретическую возможность повышения компактности и существенного улучшения генерационных характеристик непрерывных химических лазеров на DF, активируемых сгоранием. Однако для достижения компактности на практике необходим учет большего числа факторов, влияющих на рабочие характеристики лазера, таких как наилучшая температура предварительного нагрева, оптимальная скорость потока, создающего охлаждающую пленку, реальный инновационный способ нагрева, что мы планируем осуществить с использованием метода численного моделирования в ближайшем будущем.

1. Carroll DL. *42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conf.*, **3012**, 1-21(2011).
2. Horkovich J.A. *AIAA Paper*, **2006**, 3753 (2006).
3. Башкин А.С., Гуров Л.В., Курдюков М.В. *Квантовая электроника*, **41** (8), 697 (2011).
4. Башкин А.С., Парфеньев М.В., Семенов С.Н. *Труды НПО «Энергомаш»*, № 24, 344 (2006).
5. Авдеев А.В., Башкин А.С., Каторгин Б.И., Парфеньев М.В. *Квантовая электроника*, **41** (7), 669 (2011).
6. Hyde J.C., Hurlock S.C. *Advanced Chemical laser Nozzle Concept*. (1975).
7. Spencer D.J. *Int. J. Chem. Kinetics*, **1**, 439 (1969).
8. Башкин А.С., Гуров Л.В., Каторгин Б.И., Петрова С.Н., Полиновский Д.В. *Квантовая электроника*, **8** (5), 429 (2008).
9. <http://webbook.nist.gov/chemistry/>.
10. Gross R.W., Bott J.F., Yin H.M. (Eds). *Handbook of Chemical Lasers* (New York: Wiley, 1976).
11. Chinese Patent, 2015105296444 (2016).