

Исследование процесса смешения реагентов в лазерной камере генераторов активной среды НХЛ с перспективными сопловыми решетками

А.В.Авдеев, Б.И.Каторгин

Показано, что использование зубчатой сопловой решетки в генераторе активной среды (ГАС) непрерывных химических лазеров (НХЛ) позволяет достичь более эффективного перемешивания реагентов в лазерной камере, чем в ГАС со щелевой сопловой решеткой. Приведены результаты расчетов параметров активной среды DF-НХЛ, работающего в режиме усилителя, для ГАС с традиционной и перспективной конструктивными схемами сопловых решеток. Предложена кинетическая модель процессов в активной среде DF-НХЛ, которая позволила получить хорошее совпадение с результатами измерений коэффициента усиления слабого сигнала.

Ключевые слова: непрерывный химический лазер, генератор активной среды, сопловая решетка, зубчатая сопловая решетка.

1. Введение

В настоящей работе предлагается считать перспективными такие сопловые решетки, которые позволяют обеспечить интенсификацию процессов смешения в лазерной камере потоков окислительного газа, содержащего атомарный фтор, с потоками вторичного горючего путем увеличения площади контакта соседних струй этих потоков. Существует несколько типов конфигураций сопловых решеток, обеспечивающих подобную интенсификацию процессов смешения: сопла НУЛТЕ [1, 2], сопла с «трипсами» [3–5] и зубчатые сопла [6]. Технология изготовления практически всех указанных выше сопловых решеток значительно сложнее технологии изготовления обычной щелевой сопловой решетки, что можно отнести к их основному недостатку. В меньшей степени данный недостаток сказывается в случае зубчатых сопловых решеток. Увеличение площади контакта окислителя и вторичного горючего здесь достигается за счет внесения в обычные сопла выступов (так называемых зубьев), которые начинаются сразу за критическим сечением сопел и простираются, постепенно увеличиваясь по высоте, до среза сопел.

Цель данной работы – показать, что использование в ГАС НХЛ зубчатых сопловых решеток позволяет более эффективно, по сравнению с традиционными щелевыми решетками, смешивать реагенты в лазерной камере и увеличить усилительные свойства активной среды.

2. Постановка задачи

При проведении численных расчетов параметров ГАС была рассмотрена конфигурация зубчатой сопловой ре-

шетки, предложенной в работе [6]. Линейные размеры, определяющие геометрические параметры решетки, показаны на рис.1, а их значения приведены в табл.1.

Табл.1. Линейные размеры (в мм) рассматриваемой зубчатой сопловой решетки.

D	H	L_1	L_2	h_1	h_2	D_1	D_2
5.46	1.25	4.3	2.3	0.13	0.085	2.3	1.5

Для оценки влияния наличия зубьев в соплах окислителя и вторичного горючего на изменение процесса смешивания реагентов в лазерной камере DF-НХЛ проведено сравнение результатов, полученных при расчете характеристик зубчатой и эквивалентной ей щелевой сопловой решетки. Под эквивалентной щелевой сопловой решеткой подразумевается такая решетка, у которой степени расширения сопел окислителя и вторичного горючего по сравнению с исходной зубчатой решеткой остаются неизменными.

Периодическая структура рассматриваемых конфигураций зубчатой сопловой решетки позволяет при трехмерном описании течения газа в соплах и лазерной камере ограничиться рассмотрением одного периода сопел вдоль оси z и одного полупериода зубьев вдоль оси y (рис.2). Выделенная область течения была разбита шестигранной сеткой, при этом в проточной области лазерной камеры сетка располагалась таким образом, что расстояния между соседними узлами во всех трех измерениях были одинаковыми.

Граничные условия на входе в сопло окислителя включали в себя значения давления и температуры и состав окислительного газа. Последние были определены в результате термодинамического расчета используемой в [6] топливной композиции, мольные расходы компонентов которой представлены в табл.2. Полученная температура T_0 составила 1800 К, при этом массовые доли $C_F = 0.133$, $C_{HF} = 0.141$, $C_{He} = 0.256$, $C_{CF_4} = 0.309$, $C_{N_2} = 0.138$. Стоит отметить, что полученная массовая доля атомарного фтора оказалась близкой к ее оптимальному значению согласно критериям, приведенным в работе [7].

А.В.Авдеев. Московский авиационный институт (государственный технический университет), Россия, 125871 Москва, Волоколамское ш., 4; e-mail: alex021894@mail.ru

Б.И.Каторгин. НПО Энергомаш им. акад. В.П.Глушко, Россия, 141400 Московская обл., Химки, ул. Бурденко, 1

Поступила в редакцию 13 декабря 2019 г., после доработки – 10 марта 2020 г.

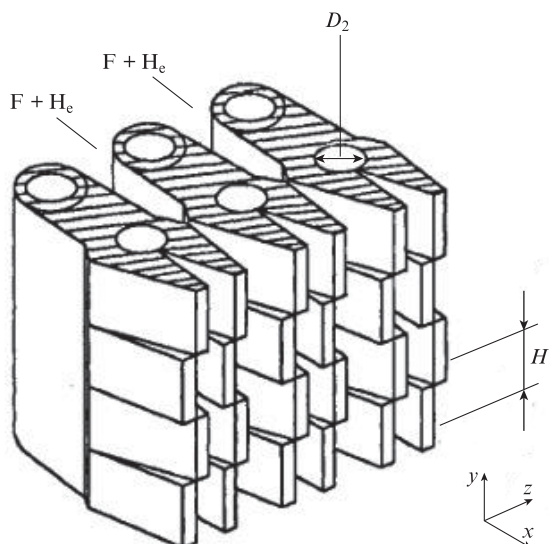


Рис.1. Конфигурация зубчатой сопловой решетки.

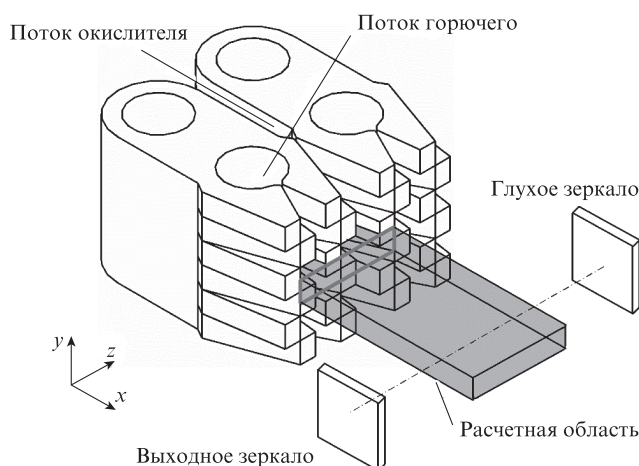


Рис.2. Схема постановки задачи.

Табл.2. Нормированные значения мольных расходов компонентов, подаваемых в камеру сгорания и тракт вторичного горючего (согласно [6]).

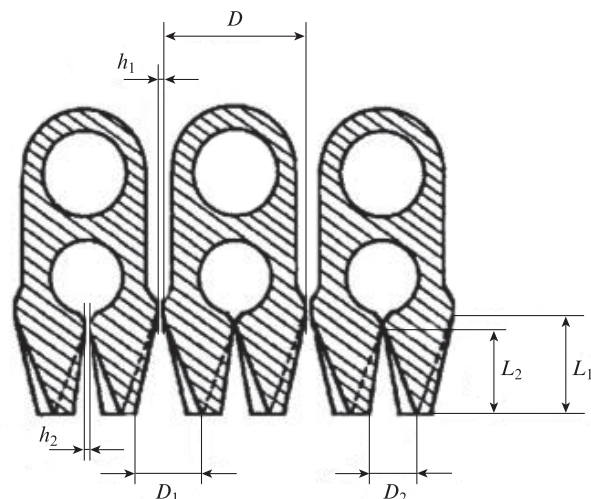
Камера сгорания	Тракт вторичного горючего
$G_{\text{NF}_3} = 0.072$	$G_{\text{D}_2} = 0.17$
$G_{\text{C}_2\text{H}_4} = 0.013$	$G_{\text{He}} = 0.249$
$G_{\text{He}} = 0.496$	

Давление p_0 в камере сгорания согласно [6] было принято равным 10 атм, но были рассмотрены также значения давления в камере сгорания 5 и 2 атм.

Температура T_0 и давление на входе в сопло вторичного горючего принимались равными 500 К и 3 атм соответственно. Массовые доли компонентов, пересчитанные из их мольных расходов (см. табл.2), составили: $C_{\text{D}_2} = 0.406$, $C_{\text{He}} = 0.594$. Температура стенок сопел полагалась также равной 500 К.

3. Описание численной модели. Основные допущения

Процессы, протекающие в активной среде НХЛ, помимо смешения струйных потоков окислителя и вторич-



ного горючего, включают в себя множество элементарных физико-химических превращений, приводящих к образованию инверсии населенностей на колебательно-вращательных переходах молекулы HF (DF). При наличии оптического резонатора появление инверсии населенностей приводит к возникновению генерации излучения и, соответственно, к дополнительным радиационным процессам, происходящим в активной среде. По этой причине строгий расчет энергетических характеристик и структуры поля излучения в активной среде должен быть основан на использовании системы уравнений газовой динамики совместно с системой уравнений для поля лазерного излучения, генерируемого в оптическом резонаторе. При записи этих уравнений предполагается, что оптический резонатор НХЛ представляет собой резонатор Фабри–Перо, образованный двумя плоскопараллельными зеркалами. Распределение молекул HF (DF) по вращательным уровням принимается больцмановским. В этом случае (при быстрой вращательной релаксации молекул) генерация излучения в колебательных полосах $v \rightarrow v-1$ в каждом фиксированном по потоку сечении происходит лишь на одном колебательно-вращательном переходе Р-ветви $v, j_v \rightarrow v-1, j_{v-1}$. При этом вращательное квантовое число j в данном сечении определяется условием максимума усредненного вдоль оптической оси коэффициента усиления в данной колебательной полосе.

Коэффициент усиления является основной характеристикой активной среды, позволяющей оценивать энергетические характеристики НХЛ. Локальное значение коэффициента усиления на заданном колебательно-вращательном переходе Р-ветви $v, j_v \rightarrow v-1, j_{v-1}$ молекулы HF или DF, определяемого координатами x, y, z , рассчитывается следующим образом:

$$g_{v,v-1}^{j_v,j_{v-1}}(x,y,z,v) = \frac{\rho N_A c^2}{8\pi W_i^2(v_{v,v-1}^{j_v,j_{v-1}})} A_{v,v-1}^{j_v,j_{v-1}} \frac{\theta_{\text{rot}}}{T} \times (2j_{v-1}-1)f(v_0)\exp\left[-\frac{\theta_{\text{rot}}}{T}j_{v-1}(j_{v-1}-1)\right] \times \left[C_i(v) - \exp\left(-\frac{2\theta_{\text{rot}}}{T}j_{v-1}\right)C_i(v-1)\right], \quad (1)$$

где ρ – плотность смеси; N_A – число Авогадро; c – скорость света; $A_{v,v-1}^{j_v,j_v-1}$ – коэффициент Эйнштейна для спонтанного излучения на данном колебательно-вращательном переходе; W_i – молекулярная масса i -го компонента; θ_{rot} – характеристическая вращательная температура ($\theta_{\text{rot}}^{\text{HF}} \approx 30$ K, $\theta_{\text{rot}}^{\text{DF}} \approx 15.8$ K); T – температура; C_i – массовая доля i -го компонента; $f(v_0)$ – функция, определяющая форму спектральной линии с учетом как доплеровского, так и лоренцевского уширения (при высоких давлениях в активной среде вклад лоренцевского уширения может быть существенен),

$$f(v_0) = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{2}{\Delta v_D} \exp(a^2) [1 - \operatorname{erf}(a)],$$

$$\operatorname{erf}(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a \exp(-t^2) dt$$

– функция ошибок; v_0 – центральная частота (в см^{-1}) линии перехода; $a = \Delta v_L / \Delta v_D \sqrt{\ln 2}$; $\Delta v_D = (2v_0/c) \times \sqrt{(2RT/W_i) \ln 2}$ (доплеровская ширина линии); $\Delta v_L = 5 \times 10^6 p 300/T$ (лоренцевская ширина линии); R – универсальная газовая постоянная; p – давление в торрах.

Вероятность перехода $v, j_v \rightarrow v-1, j_{v-1}$ описывается квадратом матричного элемента $R_{v,v-1}$. Входящий в выражение для коэффициента усиления коэффициент Эйнштейна связан с матричным элементом выражением

$$A_{v,v-1}^{j_v,j_v-1} = \frac{64\pi^4}{3h} (v_{v,v-1})^3 \frac{j_{v-1}}{2j_{v-1}-1} |R_{v,v-1}|^2. \quad (2)$$

Матричные элементы для различных переходов Р-ветви молекул HF и DF наиболее точно рассчитаны в [8], где была предложена следующая зависимость:

$$R_{v,v-1} = a_0 + a_1(-j_{v-1}) + a_2(-j_{v-1})^2 + a_3(-j_{v-1})^3. \quad (3)$$

Коэффициенты a_0, a_1, a_2, a_3 для расчета значений матричных элементов представлены в табл.3.

Для определения коэффициента усиления слабого сигнала рассматриваемой конфигурации зубчатой сопловой решетки и сравнения полученных результатов с экспериментальными данными, приведенными в работе [9], использовалось соотношение

$$G_{v,v-1}^{j_v,j_v-1}(x) = \frac{1}{h_y h_z} \int_0^{h_y} \int_0^{h_z} g_{v,v-1}^{j_v,j_v-1}(x, y, z, v) dy dz, \quad (4)$$

где h_y, h_z – размеры одного полупериода зубьев и одного периода сопел соответственно; $g_{v,v-1}^{j_v,j_v-1}(x, y, z, v)$ – локальное

значение коэффициента усиления слабого сигнала на заданном колебательно-вращательном переходе молекулы DF.

4. Результаты расчета смешения реагентов для ГАС DF-НХЛ с различной конструкцией сопловых решеток

На рис.3,а на примере распределения массовой доли атомарного фтора показано, как изменилась поверхность

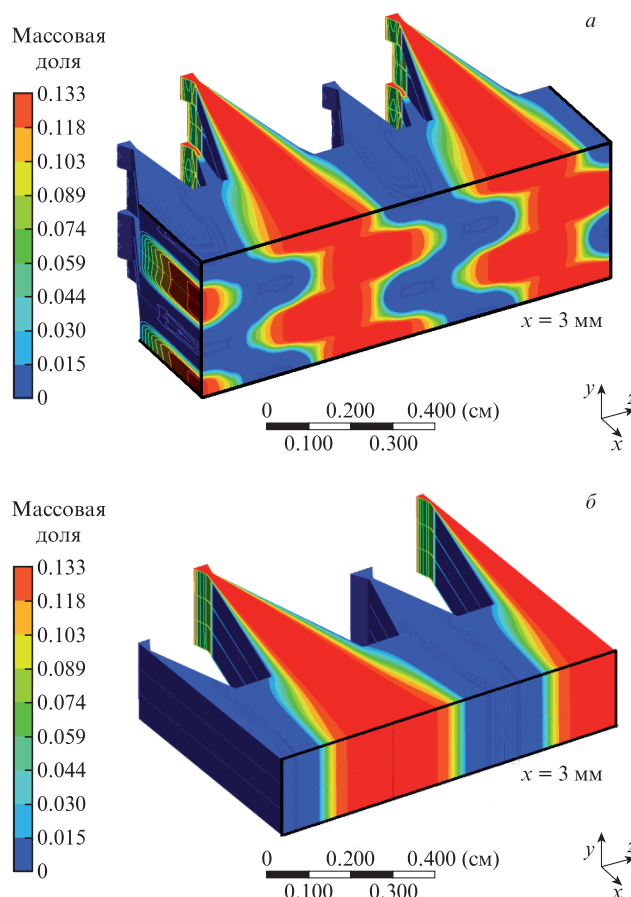


Рис.3. Распределение массовой доли атомарного фтора на расстоянии 3 мм от среза зубчатой (а) и щелевой (б) сопловых решеток. Цветные варианты рис.3–5 помещены на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

Табл.3. Коэффициенты a_0, a_1, a_2, a_3 для расчета матричных элементов.

v	HF			
	a_0	a_1	a_2	a_3
1	1×10^{-19}	-2.681×10^{-21}	6.899×10^{-24}	-2.181×10^{-25}
2	1.401×10^{-19}	-3.876×10^{-21}	6.250×10^{-24}	-2.809×10^{-25}
3	1.688×10^{-19}	-4.848×10^{-21}	3.393×10^{-24}	-3.263×10^{-25}
4	1.902×10^{-19}	-5.7×10^{-21}	-5.726×10^{-24}	-3.822×10^{-25}
v	DF			
	a_0	a_1	a_2	a_3
1	8.524×10^{-20}	-1.644×10^{-21}	3.73×10^{-24}	7.126×10^{-26}
2	1.2×10^{-19}	-2.365×10^{-21}	4.191×10^{-24}	8.931×10^{-26}
3	1.456×10^{-19}	-2.942×10^{-21}	3.973×10^{-24}	1.07×10^{-25}
4	1.66×10^{-19}	-3.442×10^{-21}	3.108×10^{-24}	-1.232×10^{-25}

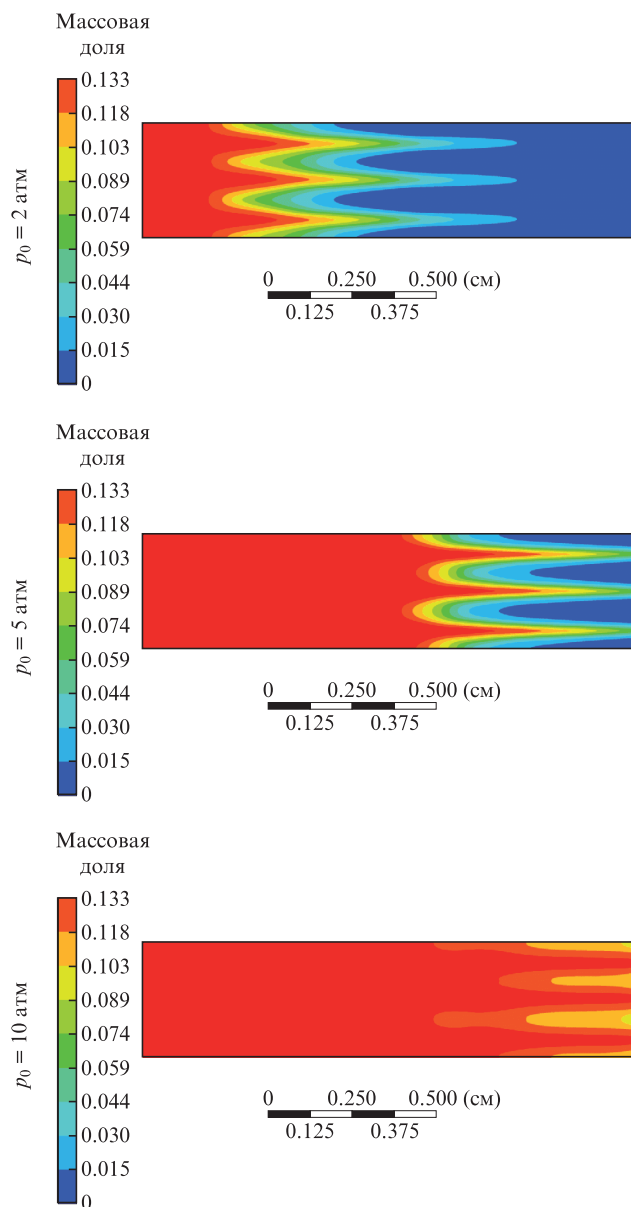


Рис.4. Распределения массовой доли атомарного фтора вдоль по потоку активной среды DF-NHL с зубчатой сопловой решеткой в центральной плоскости сопла окислителя при различных давлениях в камере сгорания (начало отсчета – от среза сопловой решетки).

смешения на расстоянии 3 мм от среза рассматриваемой сопловой решетки. Для сравнения аналогичная картина, соответствующая случаю эквивалентной щелевой сопловой решетки, приведена на рис.3,б.

Построив в центральном сечении сопла окислителя распределение концентрации атомарного фтора, можно качественно оценить интенсивность перемешивания компонентов в лазерной камере вдоль по потоку. Данные распределения, полученные для трех рассматриваемых случаев давления в камере сгорания, представлены на рис.4. Видно, что с увеличением давления в камере сгорания и, соответственно, с увеличением давления в активной среде длина зоны перемешивания увеличивается. Это объясняется уменьшением диффузии отдельных компонентов, что, в свою очередь, и приводит к снижению скорости проникновения вторичного горючего в ядро потока окислителя. Однако, несмотря на негативное влияние роста дав-

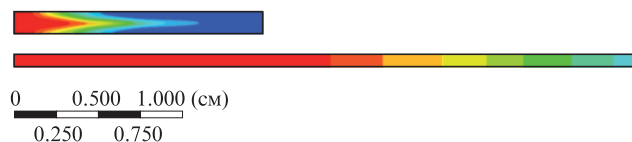


Рис.5. Распределения массовой доли атомарного фтора вдоль по потоку активной среды DF-NHL с зубчатой (в пределах одного полупериода вдоль оси y) и эквивалентной ей щелевой сопловой решеткой в центральной плоскости сопла окислителя при давлении в камере сгорания 2 атм.

ления на скорость перемешивания, можно сказать, что полное перемешивание компонентов во всех трех случаях наступает уже на расстояниях порядка 2–2.5 см.

Если рассмотреть эквивалентную щелевую решетку, то даже при самом низком из рассматриваемых давлений в камере сгорания длина зоны перемешивания компонентов окажется в несколько раз больше (рис.5).

Таким образом, использование зубчатых сопловых решеток в генераторе активной среды NHL позволяет более эффективно, по сравнению со щелевыми сопловыми решетками, смешивать реагенты в лазерной камере.

5. Расчет усилительных свойств активной среды DF-NHL с зубчатой сопловой решеткой

С использованием выражения (4) и данных о полях газодинамических параметров, полученных для режима усиления с помощью программного обеспечения Ansys CFX, а также предложенной конфигурации зубчатой сопловой решетки и при давлении в камере сгорания 10 атм были рассчитаны значения коэффициентов усиления слабого сигнала на трех колебательно-вращательных переходах молекулы DF $P_6(2-1)$, $P_8(2-1)$ и $P_7(3-2)$ в нескольких сечениях вдоль по потоку активной среды. Выбор данных переходов, как и в работе [9], объясняется тем, что именно для них в работе [6] приведены результаты экспериментального измерения коэффициента усиления слабого сигнала. В отличие от [9], пакет констант скоростей химических и релаксационных процессов (далее – пакет констант) был взят из работ [10, 11], а не из [12]. Полученные распределения коэффициента усиления слабого сигнала в зависимости от расстояния от среза сопловой решетки для трех колебательно-вращательных переходов молекулы DF представлены на рис.6.

Из рисунка видно, что, в отличие от данных, приведенных в работе [9], выбранный пакет констант скоростей вполне адекватно позволяет предсказать значения коэффициента усиления на всех трех колебательно-вращательных переходах. Значительно меньшие значения коэффициента усиления в случае щелевой сопловой решетки обусловлены малой площадью поверхности смешения соседних струй окислителя и вторичного горючего и одновременно высоким давлением в зоне контакта (около 20 Тор), при котором диффузия компонентов существенно затруднена. Подобные различия в рассчитанных значениях коэффициента усиления слабого сигнала показывают, насколько введение зубчатой геометрии стенок в щелевые сопла окислителя и вторичного горючего позволяет улучшить усилительные свойства активной среды при неизменных прочих условиях.

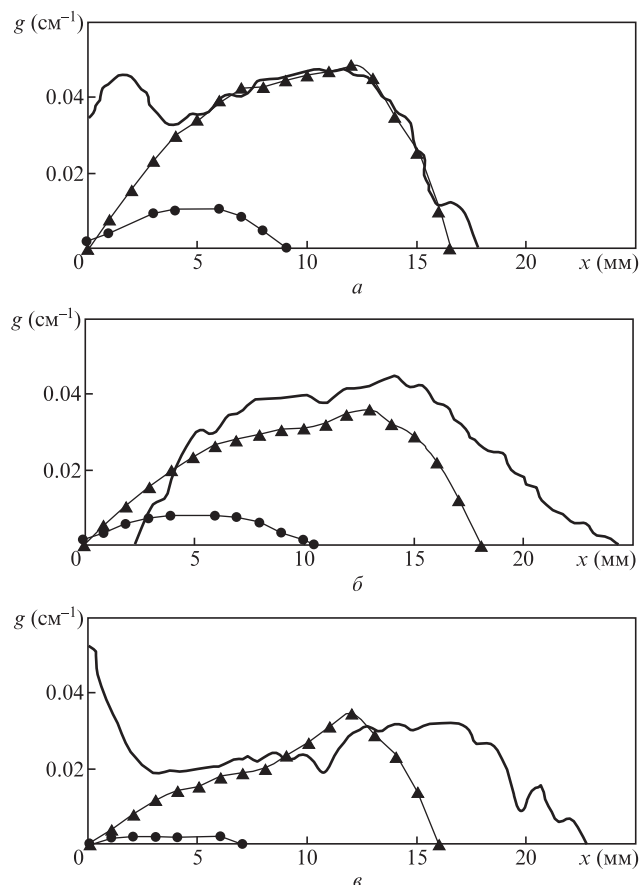


Рис.6. Распределения коэффициента усиления слабого сигнала g на колебательно-вращательных переходах $P_6(2-1)$ (а), $P_8(2-1)$ (б) и $P_7(3-2)$ (в) молекулы DF (сплошные кривые – эксперимент, $\blacktriangle$ – расчет, $\bullet$ – расчет при замене зубчатой сопловой решетки эквивалентной щелевой).

6. Выводы

1. Предложенная кинетическая модель процессов в активной среде DF-НХЛ позволила получить хорошее совпадение результатов ее использования с опубликованными

экспериментальными данными измерений коэффициента усиления слабого сигнала на различных колебательно-вращательных переходах молекулы DF, полученными для ГАС с зубчатой сопловой решеткой.

2. Показано, что наличие выступов в сверхзвуковой части сопел окислителя и вторичного горючего позволяет более эффективно, по сравнению со щелевыми сопловыми решетками, смешивать реагенты в лазерной камере в относительно широком диапазоне давлений.

3. При замене зубчатой сопловой решетки на эквивалентную щелевую получены существенно меньшие значения коэффициента усиления слабого сигнала, что объясняется меньшей скоростью перемешивания реагентов и, соответственно, меньшей скоростью наработки колебательно-возбужденных молекул DF.

Следующим шагом в исследовании генераторов активной среды с зубчатыми сопловыми решетками может стать исследование энергетических характеристик активной среды НХЛ с такими решетками.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания № 13.9211.2017/8.9 Министерства науки и высшего образования РФ.

1. Hook D., Sollee J. *Techn. Report*, CR-RD-DE-87-15. TRW (1987).
2. <https://www.semanticscholar.org/paper/Review-of-rate-data-for-reactions-of-interest-in-HF-Cohen-Bott/d42fccf3a8a2219b53a3fb6a6ad950f419d7f259>.
3. Wilson L.E. *Proc. SPIE*, **76**, 51 (1976).
4. Driscoll R.J., Tregay G.W. *AIAA Paper*, № 81, 1271 (1981).
5. Wilson L.E. *Journal de Physique*, **41**, C9.1 (1980).
6. Voignier F., Merat F., Brunet H. *Proc. SPIE*, **1397**, 297 (1990).
7. Федоров И.А. *Непрерывные химические лазеры на рабочих молекулах фтористого водорода и фтористого дейтерия: учебное пособие. Кн. 1* (СПб: БГТУ, 1994).
8. Arunan E., Setser D.W., Ogilvie J.F. *J. Chem. Phys.*, **97**, 1734 (1992).
9. Башкин А.С., Гуров Л.В. *Труды НПО «Энергомаш»*, № 27, 331 (2010).
10. <https://www.osti.gov/biblio/6445067-review-rate-data-reactions-interest-hf-df-lasers-technical-report>.
11. Гросса Р., Ботт Дж. *Химические лазеры* (М.: Мир, 1980).
12. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Review-of-Rate-Coefficients-in-the-H2-F2-Chemical-Cohen/cbdccf457813f2f50b37a1f097363e65e629eb19>.