

Расчет смесительной камеры эжекторного химического кислородно-иодного лазера

М.В.Загидуллин, В.Д.Николаев

Рассчитаны параметры газа на выходе смесительной камеры эжекторного химического кислородно-иодного лазера с состоящим из трех типов сопел сопловым блоком, который обеспечивает полное давление активной среды, значительно превышающее давление в генераторе синглетного кислорода. Такой метод формирования активной среды лазера позволяет намного облегчить выброс отработанного газа в атмосферу, используя диффузор и одноступенчатые вакуумные системы на основе водокольцевых насосов.

Ключевые слова: химический кислородно-иодный лазер, смесительная камера, эжектор.

1. Введение

Химический кислородно-иодный лазер (КИЛ) является первым химическим лазером на электронных переходах с $\lambda = 1.315$ мкм в ближней ИК области. Исходными рабочими компонентами лазера являются перекись водорода, раствор гидроокиси калия (щелочь), хлор и иод. В процессе реакции получают абсолютно нетоксичные продукты, такие как калийная соль и вода.

Простота и дешевизна получения активной среды, слабое поглощение излучения КИЛ в атмосфере [1–4] и его эффективное взаимодействие с материалами [5] обеспечивают такому лазеру широкие области применения. Создание кварцевых световодов с малыми потерями [2, 6] еще больше расширяет технологические возможности КИЛ. К числу важнейших технологических задач, решаемых с помощью КИЛ, относится, в первую очередь, дистанционная роботизированная лазерная разделка отработавшего свой срок радиоактивного оборудования атомных энергетических установок [6, 7], обеспечивающая минимальное загрязнение окружающей среды. Кроме того, можно отметить ремонт под водой корпусов кораблей, резку толстых заготовок из стали и алюминия, сварку алюминиевых кузовов автомобилей и др. [5]. Более эффективное (по сравнению с CO₂-лазером) взаимодействие излучения КИЛ с металлами [5] обеспечивает, например, вдвое большую производительность при резке стали.

Размеры, вес и энергетические затраты системы выхлопа отработанной активной среды в значительной мере определяют технический КПД химического КИЛ. Эффективность системы выхлопа отработанной среды зависит от удельной мощности на единицу откачивающей способности насосной системы (Вт·с/л или Дж/л). Типичное значение этого параметра для существующих лазеров составляет 1 Дж/л.

Существуют две возможности его увеличения: подь-

ем давления торможения сверхзвукового потока активной среды в резонаторе и восстановленного давления в диффузоре [8] либо использование дозвукового течения среды с высоким статическим давлением и малыми потерями полного давления [9].

В [10] полное давление среды в химическом КИЛ с дисковым генератором было увеличено почти до 100 мм рт. ст. за счет предварительного разбавления хлора гелием в пропорции 1:6. Однако высокая плотность газа в реакционной зоне способствует возникновению нестабильностей в жидкой пленке, генерации и захвату аэрозоля рабочего раствора, создает дополнительное диффузионное сопротивление массопереносу хлора к поверхности дисков. В связи с изложенным данный метод имеет ограниченные возможности увеличения восстановленного в диффузоре давления. Дозвуковой КИЛ позволяет ослабить требования к системе откачки и поднять удельную мощность до 3.1 Дж/л [11], но малая протяженность зоны усиления в этом лазере приводит к значительному увеличению лучевой нагрузки на зеркала. Кроме того, в дозвуковых лазерах выхлопное давление остается сравнительно низким, чтобы обеспечить использование экономичных одноступенчатых насосных систем.

Для значительного увеличения полного и восстановленного давления в КИЛ в работах [12, 13] было предложено использовать новый эжекторный метод приготовления активной лазерной среды. Он позволяет растянуть зону усиления и значительно поднять восстановленное давление потока за счет одновременного увеличения статического давления и числа Маха в резонаторе. При этом функции энергопереноса и обеспечения высокого полного давления выполняются разными газовыми компонентами.

В данном случае одни сопла соплового блока обеспечивает инжекцию в зону смешения малоразмерных струй кислорода со звуковой или слабо сверхзвуковой скоростью и умеренным статическим давлением (например, 10 мм рт.ст.), а другие формируют при том же статическом давлении сверхзвуковые высоконапорные струи азота (или другого буферного газа) с малой примесью паров иода. Если суммарный импульс азотных струй значительно превышает импульс кислородных, то

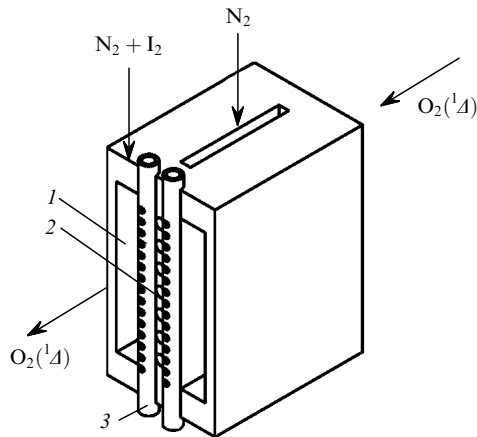


Рис.1. Фрагмент эжекторного соплового блока:
1 – щели для кислорода; 2 – цилиндрические каналы для эжектируемого азота; 3 – перфорированные трубки для смеси $N_2 + I_2$.

полное давление полностью перемешанного газа будет определяться практически азотным потоком, полное давление и число Маха которого являются свободными параметрами.

Однако данной схеме присущи определенные внутренние противоречия. В самом деле, необходимость использования азота с высоким полным и низким статическим давлением в смесительной камере диктует применение сопел с большим числом Маха. Статическая температура газовых струй на выходе таких сопел оказывается чрезвычайно низкой, а степень перенасыщения паров иода может достигать 5–10 порядков, что создает благоприятные условия для возможной конденсации паров иода. Предотвращение конденсации паров иода требует использования сопел с числом Маха, не слишком отличающимся от единицы.

Это противоречие можно устранить, если для инъекции в поток необходимого количества паров иода использовать специальные дополнительные сопла, формирующие струи с околозвуковой скоростью и небольшим расходом азота в качестве газа-носителя. При этом высоконапорные струи должны содержать только чистый N_2 . Параметры полностью перемешанного газа можно оценить с помощью метода, используемого для расчета газовых эжекторов, работающих в критическом режиме [14].

Фрагмент экспериментально исследованного пластикового соплового блока [15, 16] показан на рис.1. Из генератора синглетного кислорода через плоские щелевые сопла в смесительную камеру поступает кислород с полным давлением ~ 30 мм рт.ст. Через цилиндрические каналы блока инжектируются высоконапорные струи, полное давление которых может превышать атмосферное. Цилиндрические трубки служат для впрыскивания паров иода с буферным газом при малом числе Маха.

Использование такого соплового блока позволило создать сверхзвуковой эжекторный КИЛ с химической эффективностью 19.7 %, давлением в трубке Пито более 100 мм рт.ст. и полным давлением активной среды около 220 мм рт.ст.

2. Методика расчета

Будем считать, что все сопла являются звуковыми с суммарными площадями критических сечений F_{0i} ($i = 1, 2, 3$). Пренебрежем неоднородностью потоков на выходе

сопел, связанной с наличием пограничных слоев. Поскольку суммарная площадь всех сопел значительно меньше площади поперечного сечения камеры, то свободные струи расширяются, занимая площади с поперечными сечениями F_i , ускоряются и заполняют все сечение камеры ($F_1 + F_2 + F_3 = F$). При этом статические давления в струях становятся равными, $P_i = P$. Плоскость, в которой расположены выходные сечения сопел, не может быть использована для расчета параметров газа, т.к. распределение давления в донных областях соплового блока неизвестно. Поэтому за начальное сечение примем плоскость, где все струи смыкаются, а статические давления становятся одинаковыми. При этом, пренебрегая возникновением так называемых бочек, ударных волн и поперечных составляющих импульса, будем полагать, что свободное расширение струй является адиабатическим. Очевидно, что такой подход приведет к некоторому занижению потерь полного давления, статической температуры и завышению восстановленного давления за ударной волной. Однако, как будет показано на конкретном примере ниже, такое завышение является несущественным.

Введем обозначения: $R = 8.314 \cdot 10^7$ эрг/(К·моль) – универсальная газовая постоянная; k_i – показатели адиабаты; T_{0i} – температуры торможения; P_{0i} – давления торможения; m_i – молярные массы газов (индексы $i = 1 - 5$ при параметрах обозначают, что данный параметр относится к высоконапорному азоту (1), кислороду (2), азоту с парами иода (3), полностью перемешанному газу на выходе смесительной камеры (4) и полностью перемешанному газу за скачком уплотнения, которое измеряется трубкой Пито (5));

$$m_3 = \frac{254P_1 + 28P_N}{P_1 + P_N}$$

– молярная масса азотной смеси с парами иода; P_1 – парциальное давление паров иода; P_N – давление азота в камере, используемой для измерения концентрации паров иода абсорбционным методом; $G_i = 10^{-3} m_i g_i$ – массовый расход газа в г/с;

$$g_i = 1.333 \cdot 10^6 \left[\left(\frac{k_i}{m_i R T_{0i}} \right) \left(\frac{2}{k_i + 1} \right)^{(k_i+1)/(k_i-1)} \right] P_{0i} F_{0i} \quad (1)$$

– молярный расход газа в ммоль/с; $C_i = (R/m_i)[k_i/(k_i - 1)]$ ($i = 1, 2, 3$) – удельные теплоемкости при постоянном давлении; Q^* – тепловыделение в потоке вследствие конденсации примеси паров воды в кислородных струях, тушения синглетного кислорода и возбужденного атомарного иода; $Q = Q^*/(G_1 C_1 T_{01})$ – тепловыделение, измеряемое в единицах энтальпии эжектирующего газа, которое соответствует $\eta_q = Q^*/(G_2 C_2 \cdot 34.7 \text{ К})$ – доле потушенного $O_2(1\Delta)$ (34.7 К – разность температур чистого кислорода при его нагреве из-за релаксации одного процента $O_2(1\Delta)$);

$$A_i = \left[\frac{2RT_{0i}k_i}{m_i(k_i + 1)} \right]^{1/2}$$

– критическая скорость i -го потока; $\lambda_i = V_i/A_i$ – коэффициент скорости; $M_i = V_i/V_{i,s}$ – число Маха; V_i – скорость газа; $V_{i,s}$ – скорость звука; $X = T(\lambda)/T_0 = 1 - (k - 1)\lambda^2/(k + 1)$ – газодинамическая функция температуры;

$$\pi(\lambda) = \frac{P(\lambda)}{P_0} = \left[1 - \frac{(k-1)\lambda^2}{k+1} \right]^{k/(k-1)} \equiv X^{k/(k-1)}; \quad (2)$$

$$q(\lambda) = \frac{F_0}{F(\lambda)} = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{1/(k-1)} \lambda \left[1 - \frac{(k-1)\lambda^2}{k+1} \right]^{1/(k-1)}$$

$$= \left(\frac{k+1}{2} \right)^{1/(k-1)} \left[\frac{(1-X)(k+1)}{k-1} \right]^{1/2} X^{1/(k-1)} \equiv q(X)$$

– газодинамическая функция площади потока; $Z(\lambda) = \lambda + 1/\lambda$.

Условия равенства давления и смыкания струй имеют вид

$$P_{01}\pi(\lambda_1) = P_{02}\pi(\lambda_2) = P_{03}\pi(\lambda_3) \equiv P, \quad (3)$$

$$F_1 + F_2 + F_3 = \frac{F_{01}}{q(\lambda_1)} + \frac{F_{02}}{q(\lambda_2)} + \frac{F_{03}}{q(\lambda_3)} = F \quad (4)$$

и дают возможность определить параметры газовых струй в новом сопловом блоке.

Полагая, что

$$X_1 \equiv 1 - \frac{(k_1-1)\lambda_1^2}{(k_1+1)} \quad (5)$$

и используя (2), выразим X_2 и X_3 через X_1 :

$$X_2 \equiv 1 - \frac{(k_2-1)\lambda_2^2}{k_2+1} = X_1^{j_1} \left(\frac{P_{01}}{P_{02}} \right)^{(k_2-1)/k_2} \equiv X_2(X_1), \quad (6)$$

$$X_3 = X_1^{j_2} \left(\frac{P_{01}}{P_{03}} \right)^{(k_3-1)/k_3} \equiv X_3(X_1), \quad (7)$$

где

$$j_1 = \frac{k_1(k_2-1)}{(k_1-1)k_2}; j_2 = \frac{k_1(k_3-1)}{(k_1-1)k_3}.$$

Подстановка этих значений в (4) дает уравнение для определения X_1 :

$$F(X_1) \equiv \frac{F_{01}}{q(X_1)} + \frac{F_{02}}{q(X_2(X_1))} + \frac{F_{03}}{q(X_3(X_1))} - F = 0. \quad (8)$$

Решение этого уравнения X_1^* определяет $X_2^* = (X_1^*)^{j_1} \times (P_{01}/P_{02})^{(k_2-1)/k_2}$, $X_3^* = (X_1^*)^{j_2} (P_{01}/P_{03})^{(k_3-1)/k_3}$, коэффициенты скорости струй $\lambda_i = [(1-X_i^*)(k_i+1)/(k_i-1)]^{1/2}$, числа Маха $M_i = \{2\lambda_i^2/[X_i^*(k_i+1)]\}^{1/2}$, статическое давление $P = P_{01}(X_1^*)^{k_1/(k_1-1)}$, статические температуры $T_i = T_{0i}X_i^*$ и суммарные площади однотипных струй $F_i = F_{0i}/q_i(X_i^*)$.

Эти данные совместно с уравнениями сохранения массы, энергии и момента количества движения позволяют определить все параметры полностью перемешанного газа.

Введем новые обозначения:

$$n_1 = \frac{G_3}{G_2}; \quad n = \frac{G_2}{G_1}; \quad (9)$$

$C_4 = (G_1C_1 + G_2C_2 + G_3C_3)/(G_1 + G_2 + G_3)$ – теплоемкость перемешанного газа;

$$C^{(14)} = C_4/C_1; \quad C^{(12)} = C_2/C_1;$$

$$C^{(13)} = C_3/C_1; \quad t_2 = T_{02}/T_{01}; \quad t_3 = T_{03}/T_{01};$$

$$m_4 = \frac{g_1m_1 + g_2m_2 + g_3m_3}{g_1 + g_2 + g_3} \quad (10)$$

– молярная масса смеси;

$$k_4 = 1 + \frac{g_1 + g_2 + g_3}{g_1/(k_1-1) + g_2/(k_2-1) + g_3/(k_3-1)} \quad (11)$$

– показатель адиабаты смеси.

В этих обозначениях закон сохранения массы имеет следующий вид:

$$G_4 = G_1[1 + n(1 + n_1)],$$

$$g_4 = \frac{1000G_4}{m_4} = \frac{1000G_1[1 + n(1 + n_1)]}{m_4}. \quad (12)$$

Из закона сохранения энергии

$$\frac{G_1C_1T_{01} + G_2C_2T_{02} + G_3C_3T_{03}Q^*}{G_1C_1T_{01}} = \frac{G_4}{G_1}C^{(14)}\frac{T_{04}}{T_{01}}$$

$$= [1 + n(1 + n_1)]C^{(14)}\frac{T_{04}}{T_{01}} = 1 + n(t_2C^{(12)} + n_1t_3C^{(13)}) + Q$$

можно получить

$$T_{04} = \frac{T_{01}[1 + n(t_2C^{(12)} + n_1t_3C^{(13)}) + Q]}{1 + n(1 + n_1)C^{(14)}}, \quad (13)$$

а из закона сохранения импульса

$$\frac{G_4A_4Z_4k_4}{k_4-1} = \frac{G_1A_1Z_1k_1}{k_1-1} + \frac{G_2A_2Z_2k_2}{k_2-1} + \frac{G_3A_3Z_3k_3}{k_3-1}$$

следует, что

$$Z_4 \equiv \left(\lambda_4 + \frac{1}{\lambda_4} \right)$$

$$= \frac{G_1A_1Z_1k_1/(k_1-1) + G_2A_2Z_2k_2/(k_2-1)}{G_4A_4k_4/(k_4-1)}$$

$$+ \frac{G_3A_3Z_3k_3/(k_3-1)}{G_4A_4k_4/(k_4-1)}, \quad (14)$$

или

$$\lambda_4^2 + Z_4\lambda_4 + 1 = 0.$$

Решение уравнения (14) имеет два корня: один для полностью перемешанного сверхзвукового потока ($\lambda_4 > 1$), а второй – для потока за фронтом прямой ударной волны ($\lambda_5 = 1/\lambda_4 < 1$), где

$$\lambda_4 = \frac{Z_4}{2} + \left(\frac{Z_4^2}{4} - 1 \right)^{1/2}; \quad (15)$$

$$\lambda_5 = \frac{Z_4}{2} - \left(\frac{Z_4^2}{4} - 1 \right)^{1/2}. \quad (16)$$

Обозначив

$$X_4 \equiv 1 - \frac{(k_4-1)\lambda_4^2}{k_4+1},$$

получим

$$T_4 = T_{04}X_4, \quad (17)$$

$$q_4(X_4) \equiv \left(\frac{k_4 + 1}{2} \right)^{1/(k_4-1)} \left[\frac{(1 - X_4)(k_4 + 1)}{k_4 - 1} \right]^{1/2} X_4^{1/(k_4-1)},$$

$$X_5 \equiv 1 - \frac{(k_4 - 1)\lambda_{5,2}^2}{k_4 + 1},$$

$$q_5(X_5) \equiv \left(\frac{k_4 + 1}{2} \right)^{1/(k_4-1)} \left[\frac{(1 - X_5)(k_4 + 1)}{k_4 - 1} \right]^{1/2} X_5^{1/(k_4-1)}.$$

Чтобы определить давления торможения, необходимо выразить расход газа через газодинамические функции $q_i(X_i)$:

$$G_4 = 1333 \left[\left(\frac{k_4 m_4}{RT_{04}} \right) \left(\frac{2}{k_4 + 1} \right)^{(k_4+1)/(k_4-1)} \right]^{1/2} P_{04} F q_4(X_4),$$

где

$$P_{04} = \frac{G_4}{1333 F q_4(X_4)} \left[\left(\frac{k_4 m_4}{RT_{04}} \right) \left(\frac{2}{k_4 + 1} \right)^{(k_4+1)/(k_4-1)} \right]^{-1/2}, \quad (18)$$

$$P_4 = P_{04} X_4^{k_4(k_4-1)}. \quad (19)$$

Давление торможения газа за прямым скачком уплотнения при этом определяется выражением

$$P_{05} = \frac{P_{04} q_5(X_5)}{q_4(X_4)}, \quad (20)$$

а числа Маха связаны с коэффициентами скорости известным соотношением

$$M_{4,5} = \lambda_{4,5} \left[\frac{2}{X_{4,5}(k_4 + 1)} \right]^{1/2}. \quad (21)$$

Соотношения (1)–(21) дают решение поставленной задачи.

3. Пример расчетов для конкретного соплового блока

Численное моделирование позволяет понять степень влияния различных факторов на восстановленное давление. Сопловой блок высотой 15 мм и длиной 50 мм, фрагмент которого показан на рис.1, был использован в экспериментах с кислородно-иодным лазером и позволил достичь в трубке Пито давления, превышающего 100 мм рт.ст. при выходной мощности лазера 700 Вт и химической эффективности 19.7% [15]. Система сопел для инъекции высоконапорного азота состояла из 56 цилиндрических отверстий диаметром 1 мм (8 рядов, 7 отверстий в ряду, общая площадь $F_{01} = 0.44 \text{ см}^2$). Кислород инжектировался через 7 щелей шириной 2.5 мм общей площадью $F_{02} = 2.625 \text{ см}^2$, а пары иода с азотом – через 210 цилиндрических отверстий диаметром 0.5 мм и $F_{03} = 0.41 \text{ см}^2$.

Начальное поперечное сечение смесительной секции составляло 7.5 см^2 . Далее для компенсации нарастающих пограничных слоев на стенках канал расширялся за счет расположенных под углом 2° широких стенок. На выходе высота канала достигала 18 мм, а площадь – 9 см^2 . Реальная площадь поперечного сечения смесительной секции с учетом пограничного слоя вытеснения неизвестна и требует уточнения.

При «холодных» испытаниях соплового блока для более корректного сравнения вместо резонаторной камеры с тоннелями для зеркал использовалась аналогичная смесительная секция с закрытыми боковыми стенками. В эксперименте через иодные сопла инжектировался чистый азот, а вместо кислорода – воздух. Были получены следующие параметры газов: $g_1 = 515 \text{ ммоль/с}$, $g_2 = 39.2 \text{ ммоль/с}$, $g_3 = 11 \text{ ммоль/с}$, $T_{01} = T_{02} = 290 \text{ К}$, $T_{03} = 335 \text{ К}$, $k_i = 1.4$, $P_4 = 9 \text{ мм рт.ст.}$, $P_{05} = 79.2 \text{ мм рт.ст.}$, $M_4 = 2.55$.

Хотя геометрические параметры сопел известны, наличие пограничных слоев в них уменьшает площади выходных поперечных сечений на неизвестную величину. По этой причине для сравнения расчетов с результатами экспериментов при одних и тех же массовых расходах газа необходимо провести корректировку площади кислородных и азотных сопел. Иодные сопла представляют собой отверстия в никелевых трубках с толщиной стенки 0.1 мм и пограничными слоями не «загромождены».

Такая корректировка для измеренных давлений торможения дает $F_{01} = 0.38 \text{ см}^2$, $F_{02} = 1.65 \text{ см}^2$. Результаты расчетов для полностью перемешанного газа с учетом тепловыделения при конденсации паров воды в воздушных струях (парциальное давление паров воды принималось равным 2% от давления воздуха) зависят от действующего поперечного сечения камеры смешения (за вычетом площади пограничного слоя).

Поскольку специальный подбор угла расширения канала для точной компенсации пограничных слоев отсутствовал, расчеты проводились для нескольких площадей поперечного сечения камеры. Конечно, такая процедура не совсем корректна, поскольку она заменяет воздействие на поток боковых стенок с пограничным слоем и неизвестным распределением давления вдоль них. Результаты расчетов представлены в табл.1. Видно, что с результатами эксперимента они не совпадают.

Табл.1.

$F (\text{см}^2)$	P_4 (мм рт. ст.)	P_{04} (мм рт. ст.)	P_{05} (мм рт. ст.)	M_4	$T_4 (\text{К})$
7.5	5.71	534	100.3	3.65	80
8.0	5.17	535	94.5	3.72	78
8.5	4.71	536.9	89.3	3.79	76
9.0	4.32	537.7	84.6	3.85	74

Было высказано предположение, что при формировании ансамбля свободных струй в пространстве между трубками для инъекции паров иода (см. рис.1) возникают ударные волны, приводящие к формированию прямого скачка и дозвукового течения. При этом критическим сечением для эжектируемого газа являются не 56 цилиндрических отверстий, а щели между трубками (общая площадь щелей $F_{01}^* = 1.2 \text{ см}^2$). Давление торможения в пространстве между трубками P_{01}^* определяется из условия сохранения расхода газа: $F_{01} P_{01} = F_{01}^* P_{01}^*$, или $P_{01}^* = P_{01} F_{01} / F_{01}^*$. Полагая, что $F_{01}^* \approx 1.2 \text{ см}^2$, $P_{01} = 1220 \text{ мм рт.ст.}$, находим давление торможения газа в пространстве между трубками: $P_{01}^* = 386.25 \text{ мм рт.ст.}$ Результаты расчета для данной ситуации приведены в табл.2.

Видно, что результаты расчетов параметров газа для эффективной площади канала $F = 7.5 - 8.5 \text{ см}^2$ не очень сильно отличаются от полученных в эксперименте, а по-

Табл.2.

F (см ²)	P_4 (мм рт. ст.)	P_{04} (мм рт. ст.)	P_{05} (мм рт. ст.)	M_4	T_4 (К)
7.5	8.96	233.3	92.9	2.77	116
8.0	8.06 (14.65)	235 (121.5)	87.8 (85.5)	2.85 (2.04)	112 (188)
8.5	7.3	235	83.2	2.91	109
9.0	6.76	236	79.36	2.96	107

тери полного давления в пространстве между трубками для инъекции паров иода лишь незначительно снижают давление P_{05} в трубке Пито (примерно на 7–8 %).

Данная модель позволяет выяснить ряд принципиальных вопросов, таких как влияние на восстановленное давление молекулярного веса и показателя адиабаты эжектирующего газа, а также тепловыделения в камере смешения при подмешивании паров иода. Так, в табл.2 в скобках приведены параметры газа для тепловыделения, соответствующего релаксации 22.5 % синглетного кислорода. Легко видеть, что подогрев газа слабо сказывается на давлении P_{05} , поскольку он не изменяет импульс газового потока.

Табл.3 иллюстрирует роль молекулярного веса и показателя адиабаты эжектирующего газа при одном и том же его молярном расходе, равном 515 ммоль/с.

Табл.3. ($F = 8 \text{ см}^2$, $F_{01}^* = 1.2 \text{ см}^2$)

Газ	P_4 (мм рт. ст.)	P_{04} (мм рт. ст.)	P_{05} (мм рт. ст.)	M_4	T_4 (К)
He	4.85	50.8	35.16	2.17	118
Воздух	8.06	235	87.8	2.85	112
Ar	7.03	220	92.8	2.97	77
CO ₂ ($k = 1.35$)	10.25	327	112	2.89	118
Xe	13.8	270	142.9	2.62	93

С точки зрения обеспечения максимального восстановления давления необходимо использовать более тяжелые газы, а для более сильного охлаждения среды – газы с наибольшим показателем адиабаты.

4. Заключение

Приведена методика расчета смесительной камеры эжекторного химического кислородно-иодного лазера с

инъекцией газовых смесей с критическими перепадами давлений в сопловой решетке, состоящей из сопел трех типов. Простые одномерные расчеты дают достаточно хорошее совпадение параметров полностью перемешанного газа с параметрами, реализующимися в экспериментах, и позволяют проводить предварительные оценки ожидаемых параметров потока при использовании различных эжектируемых газов. Эжекторный метод формирования активной среды лазера позволяет получить восстановленные давления, значительно превышающие давление кислорода в генераторе, и упростить систему выброса отработанной активной среды в атмосферу.

Работа выполнена при финансовой поддержке Европейского офиса аэрокосмических исследований и разработок (проект № 007016) и при административной поддержке Международного научно-технического центра (грант 1862 P).

1. Bohn W.L. *Proc.SPIE*, **2767**, 160 (1995); *AIAA Paper № 94-2417, XXXI AIAA Plasmadynamics and Lasers Conf.* (Colorado Springs, CO, 1994).
2. Fujii H. *AIAA Paper № 94-2419; XXXI AIAA Plasmadynamics and Lasers Conf.* (Colorado Springs, CO, 1994).
3. Fulghum D.A. *Aviation week and space technology*, Aug.14, 1995, p.24–25.
4. Koop G., Hartlove J., Clendening C., Lohn P., Shih C.C., Rothenflue J., Hulich K., Truesdell K., Erkkila J., Plummer D., Walter R. *AIAA Paper 2000-2421, XXXI AIAA Plasmadynamics and Lasers Conf.* (Denver, CO, 2000).
5. Vetrovec J. *Proc. SPIE*, **3092**, 723 (1997).
6. Vetrovec J. *Proc. SPIE*, **3092**, 780 (1997).
7. Hallada M.R., Seiffert S.L., Walter R. F., Vetrovec J. *Photonics West Conf.* (San Jose, CA, USA, 2000, paper 3931A-23).
8. Walter R.F., O'Leary R.A. *AIAA Paper № 94-245, XXXI AIAA Plasmadynamics and Lasers Conf.* (Colorado Springs, CO, 1994).
9. Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Свистун М.И., Хватов Н.А. *Квантовая электроника*, **25**, 413 (1998).
10. Rittenhouse T.L., Phipps S.P., Helms C.A., Truesdell K.A. *Proc. SPIE*, **2702**, 333 (1996).
11. Wani F. et al. *Appl.Phys.B.Lasers and Optics*, **70**, 2, 225 (2000).
12. Nikolaev V.D. *Proc. SPIE*, **3268**, 157 (1998).
13. Zagidullin M.V., Nikolaev V.D., Svistun M.I., Safonov V.S., Ufimtsev N.I., Khvatov N.A. *Proc.SPIE*, **2702**, 310 (1996).
14. Абрамович Г.Н. *Прикладная газовая динамика* (М., Наука, 1976).
15. Nikolaev V.D., Zagidullin M.V., Hager G.D., Madden T.J. *AIAA Paper № 2427-2000, XXXI AIAA Plasmadynamics and Lasers Conf.* (Denver, Colorado, 2000).
16. Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Свистун М.И., Хватов Н.А., Хэйгер Г.Д., Мадден Т.Ж. *Квантовая электроника*, **31**, 30 (2001).