

Численное моделирование кинетических процессов в плазме сверхзвукового электроразрядного СО-лазера, возбуждаемого СВЧ разрядом

И.В.Анахова, Ю.Н.Власов, В.Н.Рождествин, Д.В.Шлапацкий, Д.А.Ягодников

Разработана модель расчета параметров активной среды сверхзвукового электроразрядного СО-лазера с СВЧ возбуждением, характеризующих эффективность накачки. Описан вариант конструкции такого излучателя. Проведен расчет как «горячего» варианта излучателя, когда газовая смесь создается путем сжигания топлива в газогенераторе, так и «холодного» варианта, когда газовая смесь подается в зону разряда из баллонов. Определены области оптимальных значений приведенной напряженности поля и параметров газовой смеси для «холодного» варианта. Показано, что параметры активной среды, получаемой в «горячем» варианте, соответствуют известным из литературы параметрам высокоэффективных излучателей.

Ключевые слова: СО-лазер, СВЧ разряд, излучатель на продуктах сгорания углеводородного топлива.

1. Введение

СО-лазеры отличаются высокими КПД (до 63 %) и значительной мощностью оптического излучения. Длина волны генерации этих лазеров (4.8–8.2 мкм) меньше, чем у СО₂-лазеров, что важно для некоторых приложений. Наиболее перспективны с точки зрения создания мощных высокоэффективных излучателей схемы электроразрядных СО-лазеров (СО-ЭРЛ) со сверхзвуковым потоком рабочей смеси, в которых возбуждение активной среды происходит в зоне разряда, а сверхзвуковой поток используется для охлаждения газовой смеси и удаления отработанных продуктов. Такие схемы сочетают в себе присущую газодинамическим лазерам высокую мощность выходного излучения с высокой эффективностью ЭРЛ [1]. Сравнительно недавно в печати появились сообщения о создании сверхзвуковых СО-ЭРЛ на продуктах сгорания углеводородного топлива [2]. Отмечается, что, обладая преимуществами излучателей с открытым циклом (не столь высокие требования к системам охлаждения и циркуляции, как в установках с закрытым циклом; отсутствие загрязнения активной среды продуктами плазмохимических реакций и ухудшения оптических характеристик среды в процессе работы излучателя), данная конструкция имеет большой ресурс непрерывной работы, нежели традиционные схемы сверхзвукового СО-ЭРЛ, благодаря наработке газовой смеси в процессе генерации. К достоинствам таких конструкций относится также возможность увеличения удельного энергозатрата и установления оптимальной для возбуждения колебаний приведенной напряженности поля без применения электронной пушки, а за счет использования ассоциативной ионизации при сверхзвуковом расширении газовой смеси. Тре-

бования к чистоте газовой смеси, столь жесткие для других конструкций, существенно снижаются, если выполняется иерархия времен [3]:

$$\tau_{VV} < \tau_{eV} \leq \tau_{dis} < \tau_{VT} \leq \tau_d \leq \tau_{ch},$$

где τ_{dis} – время пребывания смеси в зоне разряда; τ_{eV} , τ_d , τ_{ch} – характерные времена возбуждения колебательных уровней прямым электронным ударом, диссоциации и химических реакций; τ_{VV} , τ_{VT} – характерные времена колебательной и поступательной релаксации.

Традиционно для накачки активной среды СО-ЭРЛ используют разряд постоянного тока и высокочастотный разряд. Возбуждение активной среды микроволновым (СВЧ) разрядом имеет определенные преимущества по сравнению с возбуждением разрядами других частотных диапазонов. Они обусловлены безэлектродностью СВЧ разряда, отсутствием потерь мощности накачки на балластных сопротивлениях и в приэлектродных слоях, а также близостью к резонансу частот поля накачки и упругих столкновений электронов плазмы с нейтральными частицами [4, 5]. Кроме того, СВЧ разряд обладает более высокой устойчивостью по сравнению с разрядами других частотных диапазонов, и его применение позволит увеличить удельный энергозатрат, не опасаясь развития контракции. Хорошо освоенная промышленностью частота 2.45 ГГц, обычно используемая при накачке СО-ЭРЛ, интересна соразмерностью длины волны излучения накачки и длины плазменного столба.

Исследуемая в настоящей работе конструкция представляет собой сверхзвуковой СО-ЭРЛ, в котором для возбуждения активной среды используется СВЧ разряд в желобковом волноводе (рис.1). Такой волновод можно рассматривать как прямоугольный с продольной щелью в середине широкой стенки. Для основной моды H_{10} эта щель является неизлучающей, т. к. она не пересекает линий поверхностного тока. К краям щели пристыкованы экранирующие пластины, длина которых в перпендикулярном продольной оси направлении выбиралась такой,

И.В.Анахова, Ю.Н.Власов, В.Н.Рождествин, Д.В.Шлапацкий, Д.А.Ягодников. Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Россия, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5; e-mail: davidsh@mail.ru

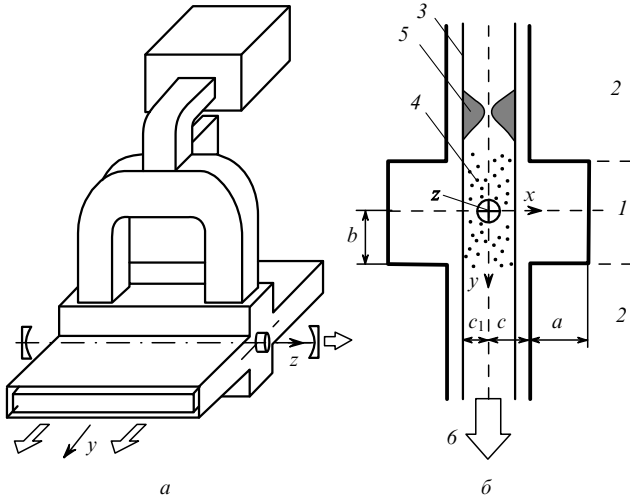


Рис.1. Схематический вид исследуемой конструкции сверхзвукового СО-ЭРЛ с СВЧ возбуждением (а) и поперечное сечение желобкового волновода (б):

1, 2 – области желоба и щелей; 3 – пролетный канал; 4 – область разряда; 5 – сверхзвуковое сопло; 6 – направление газового потока; a , b , c , c_1 – глубина и полуширина желоба, полуширина щелей и полувысота газоразрядного канала соответственно.

чтобы затухание излучения по мощности на их конце составляло 40–60 дБ. Поперечное сечение желобкового волновода изображено на рис.1,б. На нем приведены система координат, характерные размеры такой волноведущей структуры и положение пролетного канала 3, выделены область желоба 1 и две области щелей 2.

Основное достоинство желобкового волновода применительно к данной конструкции состоит в открытости этой волноведущей структуры и в органичности сопряжения с ней газового потока. Газовая смесь может подаваться в зону разряда из баллонов («холодный» вариант) или создаваться путем сжигания топлива в газогенераторе («горячий» вариант), что обеспечивает значительный массовый расход газа. Охлаждение смеси происходит за счет адиабатического расширения при истечении ее через сверхзвуковое сопло.

2. Постановка задачи и описание алгоритма расчета

Численное моделирование кинетических процессов в исследуемом разряде проводилось в двух направлениях: 1) выявление области допустимых значений параметров возбуждения и газового потока для «холодного» варианта сверхзвукового СО-ЭРЛ; 2) расчет параметров активной среды, создаваемой в потоке, который получается путем сжигания топлива в газогенераторе. Рассматривалась одномерная задача; характеристики плазмы полагались постоянными в плоскостях, перпендикулярных газовому потоку. Граничные эффекты не учитывались.

Пространство желоба вдоль потока разбивалось на 20 отрезков, в пределах каждого из которых напряженность поля и параметры плазмы считались неизменными. В этом случае относительное изменение напряженности поля, распределенной по косинусоидальному закону, не превышает 10%. Полагалось, что СВЧ излучение в желобковом волноводе распространяется в виде основной моды H_{11} . Для каждого из отрезков определялась напряженность поля; функция распределения электронов

по энергии f (ФРЭЭ) находилась в результате численного решения уравнения Больцмана в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon^{1/2} \frac{df}{dt} = & \frac{2e^{3/2}}{3m_e} E^2 \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left(\varepsilon^{3/2} \frac{v_m}{v_m^2 + \omega^2} \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \right) + \frac{2m_e}{e^{1/2}} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} (\tilde{v}_m \varepsilon^{3/2} f) \\ & + \frac{2M_e k T}{e^{1/2}} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left(\tilde{v}_m \varepsilon^{3/2} \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \right) + \sum_{t,j} [N^{(t)} f(\varepsilon + \varepsilon_j) Q_j^{(t)}(\varepsilon + \varepsilon_j) \\ & \times (\varepsilon + \varepsilon_j) - N^{(t)} f(\varepsilon) Q_j^{(t)}(\varepsilon) \varepsilon] \left(\frac{2}{em_e} \right)^{1/2} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь e , m_e и ε – заряд, масса и энергия электрона; E , ω – напряженность электрического поля и его частота; $v_m(\varepsilon) = \sum_t v_m^{(t)}(\varepsilon)$; $v_m^{(t)}(\varepsilon)$ – транспортная частота столкновений электронов с нейтральными частицами t -го компонента газовой смеси; $N^{(t)}$ – концентрация частиц t -го компонента; $Q_j^{(t)}$ – сечение j -го неупругого процесса с участием частиц t -го компонента; ε_j – убыль энергии электрона вследствие j -го неупругого процесса; $\tilde{v}_m = \sum_t v_m^{(t)}/M^{(t)}$; $M^{(t)}$ – масса частиц t -го компонента. Уравнение (1) решалось согласно [7] методом конечных разностей с использованием обратной подстановки. Сверхупругие столкновения не учитывались. Использовались значения сечений упругих (при расчете v_m) и неупругих электрон-молекулярных соударений, приведенные в [7]. С помощью найденной ФРЭЭ рассчитывались средняя энергия W_E , получаемая электроном от поля накачки в единицу времени, константы скорости возбуждения колебательных уровней СО и азота прямым электронным ударом $X_j^{(t)}$, средняя энергия W_p , передаваемая электроном в колебания молекул СО и азота в единицу времени, частоты ионизации и прилипания v_i и v_{at} . При этом использовались следующие соотношения:

$$W_E = \sum_{\varepsilon=0}^{100 \text{ эВ}} \varepsilon \Delta \varepsilon \left[\frac{2e^{3/2}}{3m} E^2 \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left(\varepsilon^{3/2} \frac{v_m}{v_m^2 + \omega^2} \right) \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \right],$$

$$X_j^{(t)} = \left(\frac{2}{m_e} \right)^{1/2} \sum_{\varepsilon=0}^{100 \text{ эВ}} Q_j^{(t)}(\varepsilon) \varepsilon f(\varepsilon) \Delta \varepsilon,$$

$$W_p = \sum_{t,j} h \nu_j^{(t)} N^{(t)} X_j^{(t)},$$

$$v_{i,at} = \left(\frac{2}{m_e} \right)^{1/2} \sum_t \sum_{\varepsilon=0}^{100 \text{ эВ}} N^{(t)} Q_{i,at}^{(t)}(\varepsilon) \varepsilon f(\varepsilon) \Delta \varepsilon.$$

Здесь $N^{(t)}$ ($t = 1, 2$) – концентрация молекул СО и азота; $h \nu_j^{(t)}$ – энергия j -го колебательного состояния молекул t -го компонента газовой смеси; $\Delta \varepsilon$ – интервал энергий электронов, в пределах которого значение ФРЭЭ полагается постоянным. Концентрация электронов определялась из уравнения ее баланса, которое записывалось отдельно для случая самостоятельного разряда, поддерживаемого полем накачки («холодный» вариант), и для случая значительной концентрации электронов на входе в электроразрядную секцию, обусловленной ассоциативной предыонизацией и характерной для сверхзвукового СО-ЭРЛ на продуктах сгорания («горячий» вариант).

Для «холодного» варианта уравнение баланса концентрации электронов n_e имеет вид

$$u \frac{dn_e}{dy} = (v_i - v_{at})n_e - \gamma n_e^2. \quad (2)$$

Здесь u – скорость газового потока; y – пространственная координата вдоль этого потока; γ – коэффициент трехчастичной рекомбинации. Использовалась эмпирическая зависимость параметра γ (в $\text{см}^3/\text{с}$) от приведенного поля, полученная в [8]: $\gamma = 8.25 \times 10^{-8} (E/N)^{-0.851}$, где E/N выражено в 10^{-16} В·см², а N – концентрация нейтральных частиц.

Решением уравнения (2) с учетом граничного условия $n_e(y = -b) = n_0^c$ является концентрация электронов в «холодном» варианте

$$n_e = \frac{v_i - v_{at}}{\gamma + \tilde{\gamma} \exp[-(v_i - v_{at})(y - b)/u]}, \quad \tilde{\gamma} = \frac{v_i - v_{at}}{n_0^c} - \gamma, \quad (3)$$

где b – полуширина желоба. Концентрация электронов на входе в электроразрядную секцию n_0^c полагалась равной 10^2 см^{-3} .

При расчете параметров активной среды, создаваемой в потоке, который получается путем сжигания топлива в газогенераторе, давление, состав и скорость газового потока в газоразрядном канале полагались заданными. Концентрация электронов в газовом потоке на входе в электроразрядную секцию n_0^h принималась равной значению 10^{11} см^{-3} , полученному экспериментально в [9] в результате исследования ассоциативной ионизации в азоте при его адиабатическом сверхзвуковом расширении. Начальная концентрация электронов n_0^h по мере продвижения потока в электроразрядной секции релаксирует к значению, определяемому приведенной напряженностью поля, поэтому концентрацию электронов n_e в каждом поперечном сечении потока можно представить в виде

$$n_e = n_0^h + \delta n(y), \quad (4)$$

где $\delta n(y)$ – поправка к начальному значению, обусловленная действием поля накачки и газокинетическими процессами. Уравнение баланса концентрации электронов запишется в следующем виде:

$$\frac{d(n_0^h + \delta n)}{dt} = (v_i - v_{at})(n_0^h + \delta n) - \gamma(n_0^h + \delta n)^2. \quad (5)$$

В результате решения уравнения (5) найдено выражение для концентрации электронов в «горячем» варианте:

$$n_e = n_0^h + \frac{B}{A} \{ \exp[A(y - b)] - 1 \},$$

$$A = \frac{v_i - v_{at} - 2n_0^h \gamma}{u}, \quad B = \frac{n_0^h}{u} (v_i - v_{at} - n_0^h \gamma). \quad (6)$$

Расчет осуществлялся для каждого пространственного шага вдоль оси y , рассчитываемые параметры определялись в результате пространственного усреднения.

3. Результаты численного моделирования

При расчете «холодного» варианта ставилась задача исследования зависимости параметров, характеризующих эффективность накачки, от состава, давления и ско-

рости газового потока, а также от приведенной напряженности поля. Рассчитывались следующие параметры: удельный объемный энерговклад $P_e = W_E n_e$; величина $\tilde{e} = P_e \tau / P_{CO}$ (где $\tau = 2b/u$ – время пролета зоны разряда), имеющая смысл удельного энерговклада, приходящегося на единицу давления (1 Тор) СО за время пролета зоны разряда; энергия, приходящаяся на одну молекулу СО за время пролета зоны разряда, $W_{CO} = P_e \tau / N_{CO}$; удельный массовый энерговклад $W_m = P_e \tau / m_V$ (где $m_V = m_0 \sum_{i=1}^K m_i N^{(i)}$ – масса единицы объема газа, m_0 – атомная единица массы, m_i и $N^{(i)}$ – относительная молекулярная масса и концентрация частиц i -го компонента газовой смеси, K – число компонентов); эффективность накачки $\eta = W_p / W_E$. Исследовалась смесь СО–N₂–Ar–He. Для набора исходных данных численно решались уравнение Больцмана (1) и уравнение баланса концентрации электронов (2); определялось характерное время возбуждения первого колебательного уровня СО: $\tau_p = (X_1^{(1)} n_e)^{-1}$. Далее методом градиентного спуска подбиралась такая скорость потока газовой смеси u , при которой τ_p отличалось от времени пребывания газа в зоне разряда не более чем на 1 %. Для мощности СВЧ генератора $P_g = 10$ кВт в предположении однородности накачки активной среды вычислялась длина разрядной области вдоль оси оптического резонатора $L_d = P_g / (4bc_1 P_e)$ (где $c_1 = 1$ см – полувысота газоразрядного канала). Результаты расчета «холодного» варианта представлены на рис.2–5.

С ростом приведенного поля параметры \tilde{e} , P_e , W_{CO} , W_m возрастают (рис.2), т. к. увеличивается концентрация электронов и энергия W_E , получаемая электроном от поля накачки в единицу времени. При фиксированной мощности генератора накачки рост приведенного поля благодаря увеличению удельного объемного энерговклада влечет за собой уменьшение длины разрядной области, что допустимо лишь до известных пределов, т. к., с одной

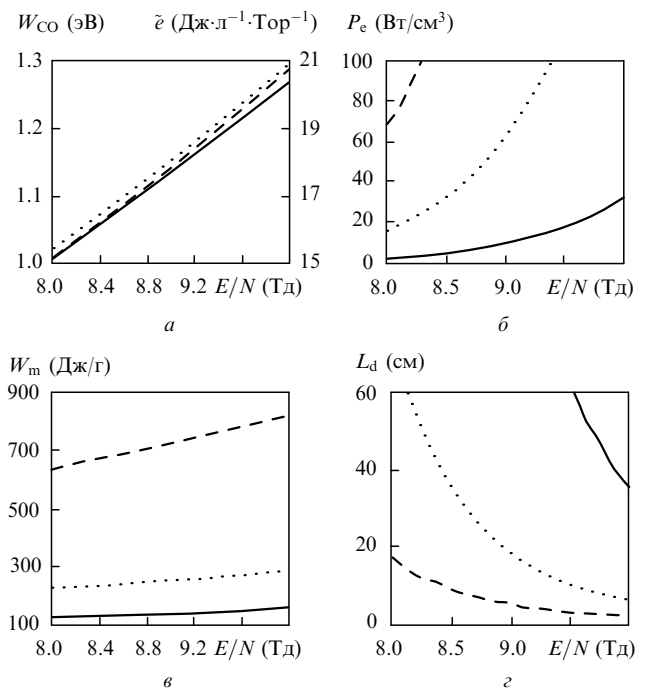


Рис.2. Зависимости параметров \tilde{e} и W_{CO} (а), P_e (б), W_m (в) и L_d (з) от приведенного поля E/N для «холодного» варианта. Смесь СО : N₂ : Ar = 5 : 10 : 85, $p = 10$ Тор (сплошные кривые), СО : N₂ : He = 5 : 10 : 85, $p = 20$ Тор (штриховые кривые) и СО : N₂ : Ar : He = 5 : 10 : 40 : 45, $p = 15$ Тор (пунктирные кривые).

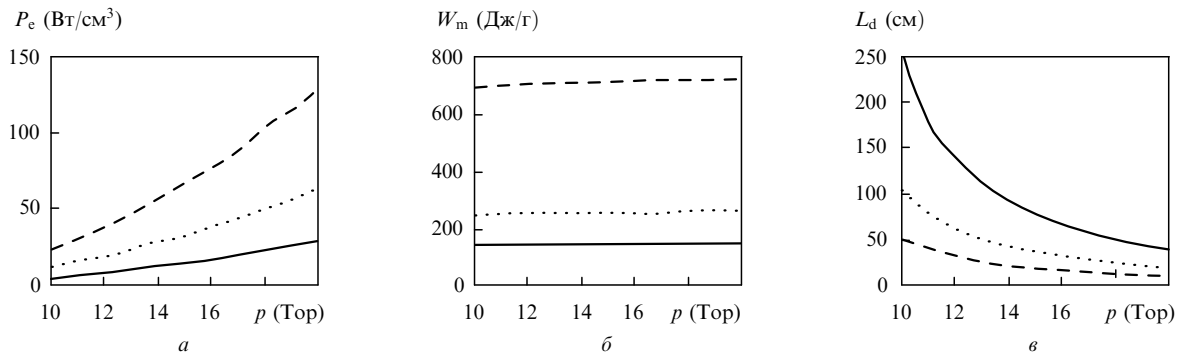


Рис.3. Зависимости от давления газовой смеси p параметров P_e (а), W_m (б) и L_d (в) для смесей $\text{CO}:\text{N}_2:\text{Ar} = 5:10:85$ (сплошные кривые), $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He} = 5:10:85$ (штриховые кривые) и $\text{CO}:\text{N}_2:\text{Ar}:\text{He} = 5:10:40:45$ (пунктирные кривые) при $E/N = 8.5$ Тд.

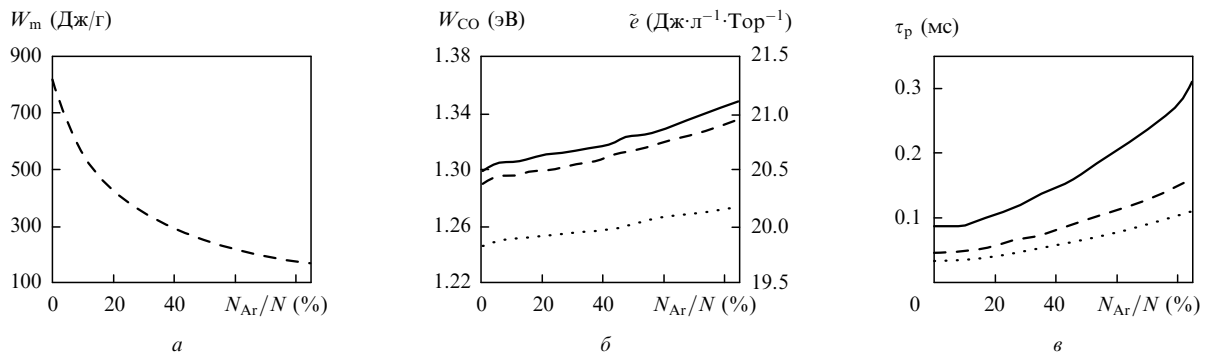


Рис.4. Зависимости параметров W_m (а), W_{CO} и \tilde{z} (б), τ_p (в) от процентного содержания Ar в смеси 5% $\text{CO}:$ 10% $\text{N}_2:$ Ar: He при $E/N = 10$ Тд, $p = 10$ (сплошные кривые), 20 (штриховые кривые) и 30 Тор (пунктирные кривые).

стороны, уменьшается усиление за проход резонатора, а с другой – ухудшаются условия согласования нагрузки в виде столба плазмы с элементами волноводного тракта. Дело в том, что поскольку электроразрядная секция представляет собой СВЧ резонатор, то ее длина должна быть не меньше половины длины волны излучения в волноводе и для облегчения согласования составлять несколько половин длин волн. Кроме того, с ростом приведенного поля уменьшается доля энергии W_p , расходуемой электроном на возбуждение колебаний молекул CO и N_2 . Поэтому оптимальное значение приведенного поля для исследуемых смесей находится в области 8.5–9.5 Тд и для «тяжелых» смесей (со значительным содержанием аргона) сдвигается в сторону больших значений E/N .

Увеличение с ростом давления газовой смеси параметра P_e (рис.3) объясняется возрастанием W_E . Удельный массовый энерговыход от давления почти не зависит, т. к. рост W_E компенсируется увеличением плотности га-

зовой смеси. С ростом давления газовой смеси возрастает концентрация излучающих частиц, но при этом уменьшается длина разрядной области L_d . Поэтому существует оптимальное давление 12–18 Тор, при котором обеспечивается необходимое усиление за обход оптического резонатора. Для смесей, богатых аргоном, эти цифры могут быть увеличены, поскольку в данных смесях L_d больше (см. рис.3,в), что объясняется меньшей энергией W_E из-за отсутствия у атомов аргона низкорасположенных энергетических уровней с большим сечением возбуждения.

С увеличением процентного содержания аргона в смеси по сравнению с содержанием гелия энерговыход W_m уменьшается (рис.4), что естественно, т. к. при этом увеличивается удельный вес смеси. Параметры \tilde{z} и W_{CO} возрастают незначительно, т. к. увеличивается необходимое время пролета смеси через разрядную зону. Последнее обстоятельство вызвано снижением скорости возбужде-

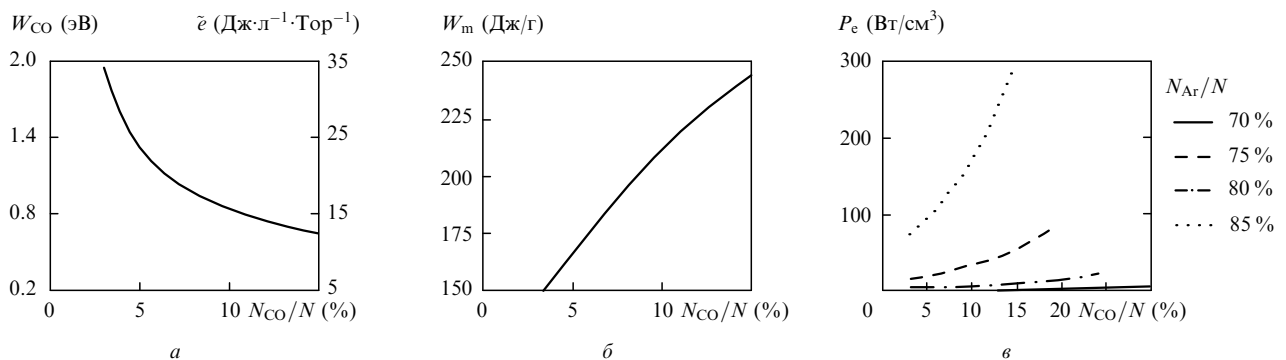


Рис.5. Зависимости параметров \tilde{z} и W_{CO} ($N_{\text{Ar}}/N = 85\%$) (а), W_m ($N_{\text{Ar}}/N = 85\%$) (б) и P_e (в) от процентного содержания CO в смеси $\text{CO}-\text{N}_2-\text{Ar}$ при $E/N = 10$ Тд, $p = 15$ Тор.

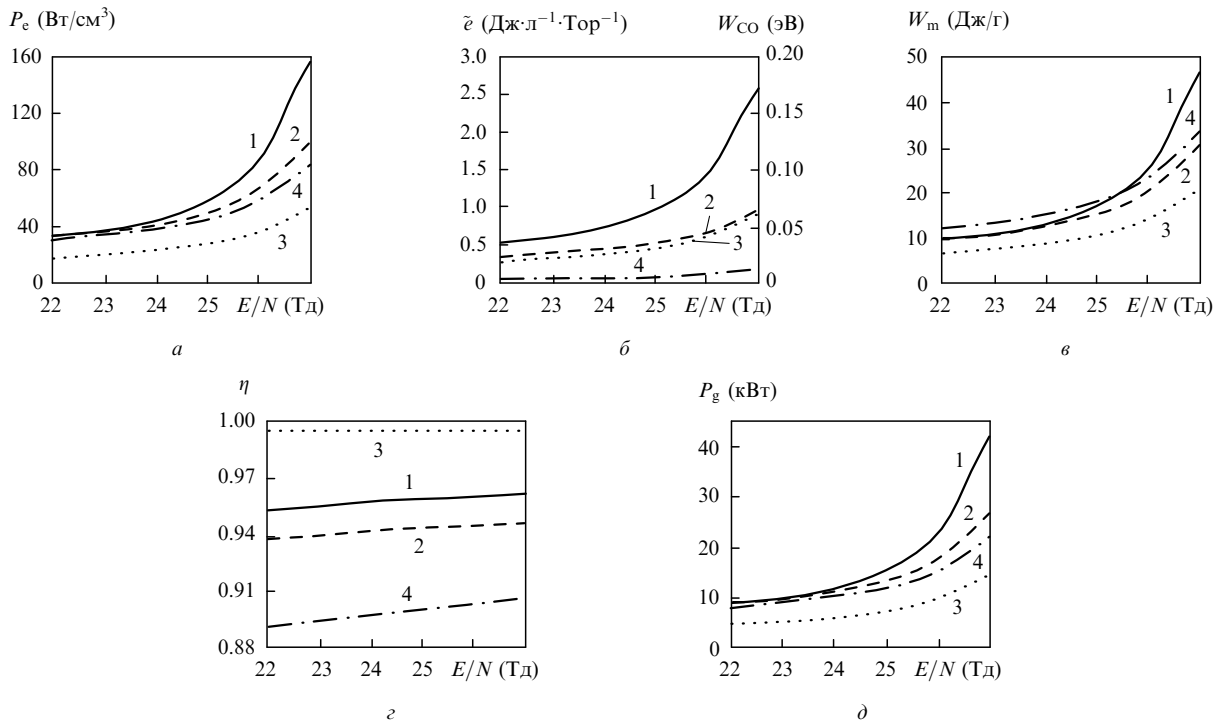


Рис.6. Зависимости от приведенного поля E/N параметров P_e (а), \bar{z} и W_{CO} (б), W_m (в), η (д) и P_g (е) для четырех составов газовой смеси (см. табл.1), получаемых путем сжигания углеводородного горючего в газогенераторе.

ния $X_1^{(1)}$ первого колебательного уровня СО из-за увеличения электронной температуры, рост которой обусловлен уменьшением неупругих потерь электронов (в структуре энергетического спектра аргона отсутствуют низко расположенные уровни с большим сечением возбуждения).

Зависимости исследуемых характеристик от процентного содержания СО в смеси представлены на рис.5. Параметры \bar{z} и W_{CO} уменьшаются с ростом содержания СО. Массовый энерговклад возрастает, т.к. молекулярные массы СО и N_2 одинаковы, а с ростом концентрации СО увеличивается объемный энерговклад P_e . Рост P_e вызван увеличением параметра W_E , которое объясняется тем, что сечения колебательного возбуждения молекул СО больше, чем у молекул азота, и рост затрат энергии электрона на возбуждение колебательных уровней компенсируется приобретением им большей энергии от поля накачки.

При расчете параметров «горячего» варианта исследовались четыре состава газовой смеси, получаемой путем сжигания углеводородного топлива в газогенераторе (табл.1). Для каждого состава были получены зависимости от величины E/N удельного объемного энерговклада P_e , параметров \bar{z} и W_{CO} , энерговклада W_m , эффективности накачки η , мощности СВЧ генератора P_g , необходи-

мой для «запитки» разрядной области размером $2 \times 30 \times 4.5$ см (первая и вторая цифры – высота и ширина пролетного канала, третья цифра – протяженность разрядной области вдоль потока) при рассчитанном объемном энергокладе P_e в предположении его однородности. Результаты расчета «горячего» варианта представлены на рис.6.

Известно [1], что стационарный режим генерации достигается при параметре \bar{z} , превышающем $1.7 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{Тор}^{-1}$. Из рис.6,б видно, что этому требованию удовлетворяет первая смесь при приведенной напряженности поля более 26 Тд. Для данной смеси типичны весьма большие значения параметра η . Существует достаточное число серийно выпускаемых отечественной промышленностью моделей СВЧ генераторов магнетронного типа частоты 2.45 ГГц, мощность которых удовлетворяет требованиям, проиллюстрированным на рис.6,д (например, источник КИЭ-5 мощностью 50 кВт). Энерговклад W_m для «горячего» варианта оказался невысоким (до 48 Дж/г). По мнению авторов [8], его пороговое значение составляет 300 Дж/г, но, возможно, данное утверждение справедливо лишь для используемой в работе [8] двухкомпонентной смеси СО– N_2 , для которой, по существу, параметр W_m имеет смысл энерговклада на «накачиваемую» молекулу, в то время как исследуемые смеси являются многокомпо-

Табл.1. Состав и параметры продуктов сгорания углеводородного горючего и воздуха.

Номер смеси	Топливо	α_{gg}	p_g (кПа)	T_g (К)	u (м/с)	Состав газовой смеси СО: N ₂ : O ₂ : H ₂ : Ar (%)
1	Ацетилен – воздух	0.397	4.2	100	1140	7.9: 71.2: 15.4: 3.9: 0.9
2	Бензол – воздух	0.404	4.2	100	1160	13.9: 67.2: 11.1: 6.9: 0.9
3	Керосин – воздух	0.37	4.2	213	1700	23.3: 52: 19.5: 0.6
4	Керосин – воздух	0.37	4.2	100	990	13.2: 63.2: 10.4: 12.3: 0.8

Примечания: α_{gg} – коэффициент избытка окислителя в газогенераторе; p_g и T_g – давление и газовая температура в газоразрядном канале.

нентными и для них более показателен параметр W_{CO} . В области $E/N > 25$ Тд большинство зависимостей резко возрастает, что объясняется ростом концентрации электронов в этой области вследствие повышения частоты ионизации.

4. Выводы

Расчет, проведенный для «холодного» варианта, показывает, что существует оптимальная приведенная напряженность поля, обусловленная уменьшением длины разрядной области и доли энергии, расходуемой электроном на возбуждение колебаний молекул СО и N₂, с ростом величины E/N . Она составляет 8.5–9.5 Тд и для «тяжелых» смесей (со значительным процентным содержанием аргона) сдвигается в сторону больших значений. Из приведенных рисунков следует, что доля аргона в смеси должна быть больше 40%. Ее увеличение целесообразно с точки зрения как уменьшения скорости VT-процессов, так и увеличения ширины плато функции распределения по колебательным уровням. Оптимальное содержание СО в смеси составляет 5%–15% и зависит от процентного содержания аргона.

Из результатов расчетов следует, что параметры активной среды, получаемой в «горячем» варианте лазера, соответствуют известным из литературы параметрам высокоэффективных излучателей. Таким образом, конструк-

ция малогабаритного СО-лазера мощностью до 10 кВт с СВЧ возбуждением на продуктах сгорания углеводородного горючего с балластировкой воздухом может быть реализована. В то же время для «холодного» варианта излучателя характерны более высокие значения параметров, определяющих эффективность накачки, что указывает на целесообразность введения в рабочую смесь, полученную в результате сжигания углеводородного горючего, корректирующей смеси газов, содержащей аргон.

1. Манн М.М. *Ракетная техника и космонавтика*, **14** (5), 8 (1976).
2. Баранов Г.А., Баранов И.Я., Борейшо А.С., Тимошук И.В. *Квантовая электроника*, **20** (3), 222 (1993).
3. Капителли М., Горсе К., Рикар А. В сб.: *Неравновесная колебательная кинетика*. Под ред. М.Капителли (М.: Мир, 1989).
4. Hoffmann P., Hugel H., Schall W., Schock W. *Appl. Phys. Lett.*, **37** (10), 673 (1980).
5. Luo X., Schafer J., Uhlenbusch J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2502**, 69 (1995).
6. Смит К., Томсон Р. *Численное моделирование газовых лазеров*. (М.: Мир, 1981).
7. Kieffer L.J. *A Compilation of Electron Collision Cross Section Data for Modeling Gas Discharge Lasers. Inf. Centre, Rep.13* (Boulder, USA, Joint Institute for Laboratory Astrophysics, 1973).
8. Бородин А.М., Гурашвили В.А., Кузьмин В.Н. и др. *Квантовая электроника*, **23** (4), 315 (1996).
9. Ачасов О.В., Жданок С.А., Рогозин Д.С. и др. *ЖЭТФ*, **81** (2), 550 (1981).