

05

Смесительный газодинамический лазер с неравновесным электродуговым возбуждением

© Г.Г. Антонов, В.Б. Ковшечников, Ф.Г. Рутберг

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,
191186 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: rc@iperas.nw.ru, not_na@front.ru

(Поступило в Редакцию 16 октября 2014 г. В окончательной редакции 5 октября 2015 г.)

Приведены результаты исследований на модельной установке смесительного газодинамического лазера (ГДЛ) с неравновесным электродуговым возбуждением. Полученные результаты и их предварительный анализ указывают на целесообразность использования плазмотронов для повышения эффективности смесительных ГДЛ за счет внесения дополнительной колебательной неравновесности состояний молекул углекислого газа. Кроме того, плазмотрон выступал источником предионизации как для быстропоточного газоразрядного лазера, так и для ГДЛ с комбинированной накачкой.

Уже первые сообщения о создании газодинамических лазеров (ГДЛ) на углекислом газе обнаруживают разнообразие средств термического возбуждения газа. Среди них ударные и аэродинамические трубы, применение горючих смесей и детонация твердых взрывчатых веществ. Наибольшие возможности проведения исследований в широком диапазоне независимого варьирования такими параметрами, как температура, давление и состав газовой смеси представляет использование для нагрева газа ударной трубы и электродуговых подогревателей — плазмотронов. Основным недостатком применения ударной трубы при моделировании стационарных процессов является малое время работы, не превышающее нескольких миллисекунд. Это ограничение снимается при переходе к электродуговому нагреву, что нашло свое отражение в целом ряде работ [1–6].

Применение плазмотронов в качестве источников термически возбужденного газа наряду с определенными технологическими преимуществами имеет такие специфические особенности, присущие электродуговому нагреву газа, как значительный контраст температур — среднемассовой и в зоне дуги — и наличие в составе плазмы материала электродов. Термодинамически неравновесный характер нагрева, принципиально возможный в силу первой из названных особенностей, может в определенных условиях повысить эффективность ГДЛ [7,8]. Следствием второй особенности является возможность введения в состав газового потока легко ионизируемой примеси для реализации комбинированной накачки с помощью несамостоятельного разряда.

Измерения, выполненные в [9], обнаружили существенное превышение электропроводности сверхзвукового потока, полученного с помощью плазмотронов, над равновесным значением. Установка (рис. 1) состояла из двух импульсно-поточных плазмотронов, смесительной камеры, сопловой решетки и сверхзвукового канала. Сопловая смесительная решетка имеет две группы сопел: „донорные“ и „акцепторные“. Первые соединяют сверхзвуковой канал со смесительной камерой и пред-

назначены для нагретого до 1200–3000 К азота, вторые служат для ввода в канал смеси $\text{CO}_2 + \text{He}(\text{H}_2\text{O})$ при температуре до 1000 К. 294 донорных и 144 акцепторных сопла образуют плотно скомпонованное гексагональное построение: по два N_2 сопла на одно CO_2 сопло. Диаметр критического сечения 0.5 mm с полууглом раскрытия соответственно 10° и 12° . Высота сопловой решетки 22 mm, ширина — 223 mm. Средний массовый расход до 0.3 kg/s.

Проводимость плазмы измерялась путем регистрации несамостоятельного тока при подаче на разрядный промежуток напряжения 100 V. На рис. 2 приводятся осциллограммы тока проводимости сверхзвукового потока I_σ в относительных единицах, давления p_0 (пунктиром — в пуске без включения плазмотронов) и температура азота T_0 в предсопловой камере. Там же приводятся зависимости суммарной за период нагрева мощности энерговыделения в дугах плазмотронов $W(t)$ и массового расхода азота $G(t)$.

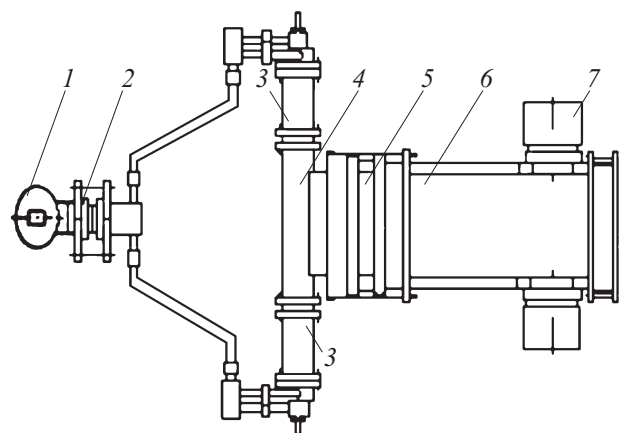


Рис. 1. Общий вид газодинамического стенда: 1 — объем высокого давления, 2 — клапан-диафрагма, 3 — плазмотрон, 4 — камера смесительная, 5 — решетка сопловая, 6 — сверхзвуковой канал, 7 — резонатор.

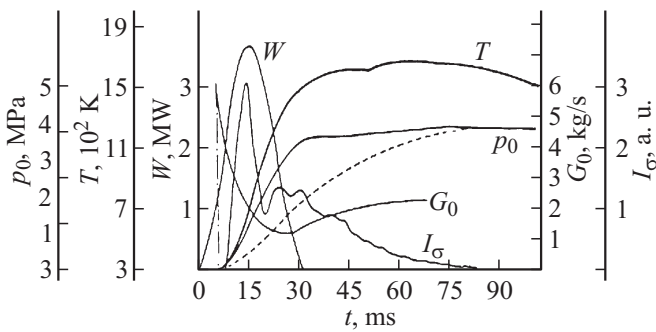


Рис. 2. Осциллограммы тока проводимости сверхзвукового потока I_σ и параметров газа в предсопловой камере.

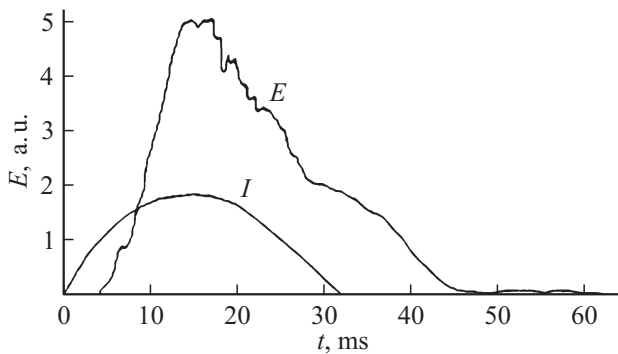


Рис. 3. Осциллограмма интенсивности свечения резонансной линии NaI (E) и тока одного из плазмотронов (I).

Температура торможения, определенная по показаниям термопары, составила 1600 ± 100 К, а вычисленная, исходя из расхода газа и вложенной в разряд энергии ($E/G = 1.2 \pm 0.2$ MJ/kg), не превышала 0.13 eV.

Анализ спектров излучения показал при этом, что температура возбуждения T^* линий Fe I, Cr I, Ca I, Ca II и Na I, определенная по наклону зависимости логарифма интенсивности от энергии уровней, а также по отношению интенсивностей линий иона и атома кальция, составляла 0.25 ± 0.05 eV.

На рис. 3 приводятся интенсивность свечения резонансной линии NaI (E) и осциллограмма тока одного из плазмотронов (I). Как видно из рисунка, свечение наблюдается несколько десятков миллисекунд после окончания импульса тока плазмотрона.

Рассчитанная по вольт-амперным характеристикам несамостоятельного разряда концентрация электронов в сверхзвуковом потоке азота достигает $n_e \sim 10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, заметно превышая равновесную, так как при этом температура газа в потоке не превышала 300 К. Этим значениям n_e соответствует степень ионизации плазмы $10^{-5} - 10^{-6}$, что на много порядков превышает равновесное значение. С учетом потерь на рекомбинацию в процессе газодинамического расширения [10] степень ионизации в предсопловой камере должна быть не менее, чем на порядок выше, а концентрация электронов составлять $n_e \approx 10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Эти значения не

могут быть объяснены равновесными процессами. Существенно, что повышенная температура возбуждения линий, как и время сохранения проводимости сверхзвукового потока I_σ , более чем на два порядка превышает время колебательной релаксации чистого азота.

Об отступлении от равновесия свидетельствуют и результаты измерения коэффициента усиления. При температуре азота перед сопловой решеткой 1800 К, результирующем мольном составе $74\% \text{ N}_2 : 7\% \text{ CO}_2 : 19\% \text{ He}$ измеренный вблизи порога генерации коэффициент усиления составил $k_0 > 2.3 \text{ m}^{-1}$. Этот результат заметно превышает полученный в [11] $k_0 = 1.5 \text{ m}^{-1}$ при нагреве азота в ударной трубе (2000 К и 6.5 МПа) при содержании 10% CO_2 в смеси. С учетом очевидной зависимости мощности генерации от содержания CO_2 полученное расхождение в измеренных значениях k_0 может достигать больших величин.

Эксперименты с генерацией лазерного излучения проводились с использованием канала прямоугольного сечения $22 \times 223 \text{ mm}$ с полууглом раскрытия 0.5°C [9]. Полукофокальный устойчивый резонатор образован плоским и сферическим ($R = 1 \text{ m}$) зеркалами диаметром 0.06 м. Коэффициент отражения на длине волны $0.63 \mu\text{m}$ составлял 98.5%. Излучение выводилось через отверстие диаметром 0.003 м в плоском зеркале. Расстояние между зеркалами 0.415 м, длина активной среды вдоль оси резонатора 0.23 м. Смесь $\text{CO}_2 + \text{He}$ вводилась в смесительную сопловую решетку под давлением от 0.35 до 0.7 МПа при комнатной температуре или нагревалась импульсным плазмотроном до 600 К. Обобщенные результаты представлены в таблице.

В экспериментах с длиной канала 0.6 м (ось резонатора удалена от сопловой решетки на 0.44 м) наблюдался срыв генерации при температуре торможения азота, превышающей 1700 К. Анализ показал, что этот эффект обусловлен недостаточным для компенсации нарастания пограничного слоя углом раскрытия канала и связанным с этим повышением статической температуры смеси. Применение укороченного на 0.23 м канала (при этом ось резонатора отстоит от сопловой решетки на 0.21 м) позволило получить при прочих равных условиях увеличение энергии генерации E_g на 30–35% (№ 1 и 2 таблицы).

Если указанные выше потери устраняются увеличением расширения канала, то потери, обусловленные ростом энтропии при смешении спутных потоков двух различных газов в сверхзвуковом канале, относятся к принципиально неустранимым. Турбулентность, возникающая из-за различия скоростей этих потоков и необходимая для быстрого смешения и эффективной передачи колебательной энергии от азота к углекислому газу, приводит, с другой стороны, к дополнительным потерям. При создании эффективной системы необходимо компромиссное решение, позволяющее сочетать качественное смешение с относительно низким уровнем потерь. Одним из важнейших параметров, определяющих уровень потерь, является статическая температура,

Сводка экспериментальных результатов

№	Азот		CO ₂ +He T ₀ , К	Мольный состав N ₂ :CO ₂ :He	Ось резонансатора, м	E _g , J
	T ₀ , К	p ₀ , МПа				
1	1700	4.0	300	82:3:15	0.44	0.9
2	1700	4.0	300	82:3:15	0.21	1.2
3	1800	4.1	300	82:4:14	0.21	1.35
4	1800	4.1	300	80:5:15	0.21	1.65
5	1800	4.1	300	77:6:17	0.21	2.7
6	1800	4.1	300	74:7:19	0.21	4.3
7	2000	4.4	300	82:4:14	0.21	1.69
8	1700	4.0	600	82:3:15	0.44	2.25

повышение которой уменьшает как коэффициент усиления, так и запасенную в резонаторе энергию.

В [11] приводятся результаты расчетов повышения статической температуры при смешении азота с $M = 6$ и температурой торможения 2000 К с потоком углекислого газа при $M = 1-5$ в функции концентрации CO₂ в перемешанном потоке. Показано, что подача CO₂ со звуковой скоростью приводит к очень большому нагреву смеси, существенно ограничивая допустимое процентное содержание углекислого газа. В то же время подача CO₂ при $T_0 = 1160$ К в количестве, обеспечивающем молярную долю 10%, вызывает менее чем 20% рост статической температуры.

С учетом изложенного процентное содержание CO₂ для канала с полууглом раскрытия 0.5° при вводе смеси с комнатной температурой было ограничено величиной 7%. Построенная по результатам экспериментов № 3–6 таблицы зависимость энергии импульса генерации от концентрации CO₂ (рис. 4) позволяет судить о влиянии этого параметра на выходные характеристики смесительного ГДЛ.

Влияние температуры торможения смеси на величину потерь при турбулентном смешении через отношение скоростей газовых потоков азота и смеси CO₂ + He характеризуется результатами экспериментов № 1 и 8 таблицы. Повышение температуры смеси до 600 К (при этом скорость звука смеси увеличивается в ~ 1.4 раза) приводит к увеличению энергии импульса генерации в 2.5 раза.

Результаты серий № 3 и 7 таблицы отражают влияние температуры азота в предсопловой камере на энергию выходного излучения. Повышение температуры с 1800 до 2000 К увеличивает энергию генерации на 25%.

Канал с полууглом раскрытия 1.5° позволил в определенных пределах увеличить диапазон изменения параметров смеси. Исследование влияния состава смеси на энергию E_g , длительность импульса τ и среднюю мощность генерации W_g проводилось с использованием в качестве выходного — зеркала из германия диаметром 0.1 м с большим по сравнению с предыдущей серией опытов коэффициентом пропускания — 30%. Температура и давление азота поддерживались равными соответственно 1300 К и 3.5 МПа. Мольный

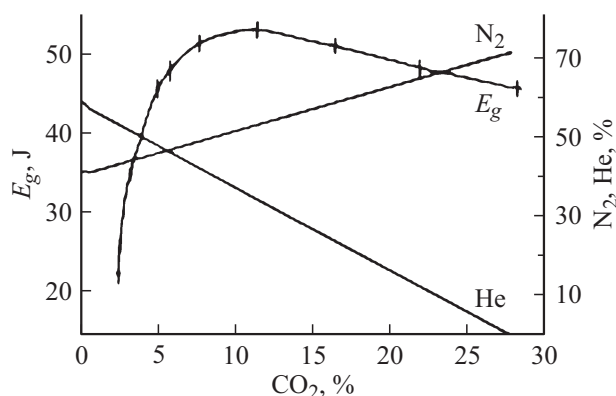


Рис. 4. Влияние состава смеси на энергию импульса генерации.

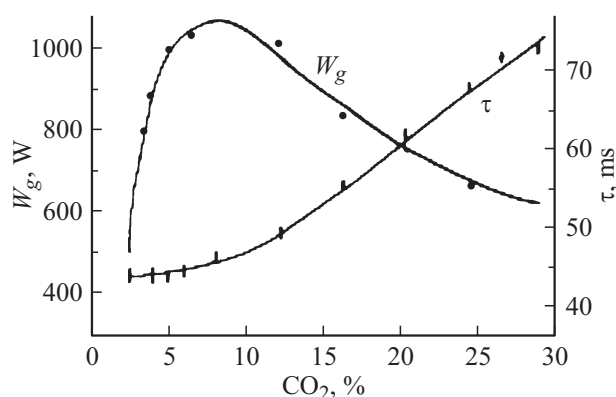


Рис. 5. Зависимость длительности импульса τ и средней мощности генерации W_g от состава смеси.

состав сверхзвукового потока варьировался изменением парциальных давлений CO₂ и He при фиксированном суммарном давлении смеси (CO₂ + He) равном 1.7 МПа и температуре 300 К. При этом каждому значению молярной доли CO₂ соответствует свое соотношение компонент N₂:CO₂:He. Обобщенные результаты представлены на рис. 4 и 5.

Как видно из рисунков, после резкого увеличения в области малых концентраций CO₂ (от 2.5 до 6%) энергия импульса генерации, достигнув для смеси 53%N₂:12%CO₂:35%He максимального значения $E_g = 53$ J, медленно спадает вплоть до бинарного состава¹ 73%N₂ + 27%CO₂ ($E_g = 46$ J).

Более значительны изменения длительности импульса τ и средней мощности генерации W_g от концентрации CO₂ (рис. 5). Рост содержания углекислоты в смеси с 8 до 27% (и соответствующее уменьшение доли гелия с 42 до 0%) приводит к увеличению τ на 50% и 60% уменьшению W_g . При этом задержка импульса генерации относительно запуска установки и время установления сверхзвукового режима течения в зоне резонатора изменяется с 25 до 30 ms, что можно

¹ Азот и углекислый газ — технически чистые. Содержание H₂O < 0.2%.

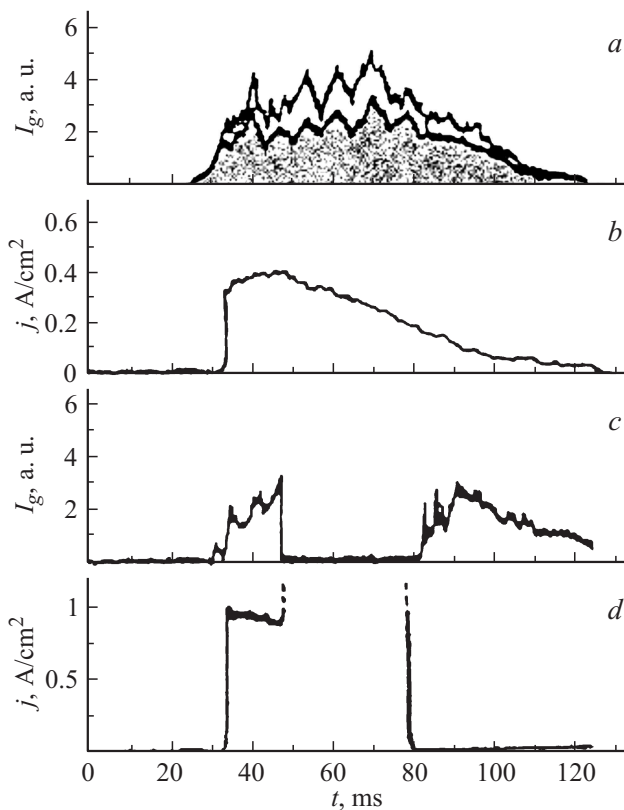


Рис. 6. Воздействие разряда на форму импульса генерации: *a* — осциллограммы импульсов генерации в режиме ГДЛ (импульс заштрихован) и режиме комбинированной накачки, *b* — ток разряда, *c* — импульс генерации в режиме комбинированной накачки и соответствующий ему ток разряда — *d*.

связать с торможением азота на смеси $\text{CO}_2 + \text{He}$ при уменьшении в ее составе доли гелия.

Эксперименты с комбинированным возбуждением проводились с максимальным для канала с раскрытием 0.5° содержанием CO_2 в смеси — 7%. Температура и давление азота перед сопловой решеткой составляли 1800 К и 4.1 МПа. Смесь углекислого газа с гелием вводилась при комнатной температуре под давлением 0.7 МПа.

Резонатор устойчивый, вывод излучения через отверстие диаметром 3 мм в плоском зеркале. Катод образован равномерно распределенными на площади 220×25 мм 200 стальными электродами диаметром 1 мм, каждый из которых подключен к общей точке через ограничительное сопротивление. Анодом служит медная пластина. Межэлектродное расстояние 22 мм. Источником питания служит конденсаторная батарея [9,12].

Воздействие разряда на форму импульса генерации иллюстрируется рис. 6.

Наибольшее превышение мощности генерации в режиме комбинированной накачки по отношению к мощности в режиме ГДЛ получено при плотности тока разряда $0.25\text{--}0.38 \text{ A/cm}^2$ ($70\text{--}110 \text{ W/cm}^3$) и составило от 50 до 80% (рис. 6, *a, b*). На рисунке представлены

типичные осциллограммы с наложением импульсов генерации в режиме ГДЛ (импульс заштрихован) и комбинированной накачки. При увеличении плотности тока j от 0.6 до 1 A/cm^2 приращение мощности генерации прекращается. При переходе разряда в контрагированный режим при $j > 1 \text{ A/cm}^2$ происходит срыв генерации. Через $5\text{--}6 \text{ ms}$ после выключения разряда генерация возобновляется (рис. 6, *c, d*).

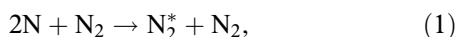
Наличие максимума эффективности накачки электрическим разрядом в области значений плотности тока $j = 0.25\text{--}0.38 \text{ A/cm}^2$, далеких от предельных значений j и удельного энерговклада, согласуются с результатами исследований [12]. Как следует из вольтамперных характеристик разряда, по мере увеличения мощности (за счет увеличения плотности тока и напряжения на разрядном промежутке) растет и приведенная напряженность электрического поля E/p . При этом предельные значения E/p , достигающие $0.35 \text{ V/cm} \cdot \text{Pa}$ ($40 \text{ V/cm} \cdot \text{Torr}$), существенно превышают оптимальную величину $0.045\text{--}0.06 \text{ V/cm} \cdot \text{Pa}$, при которой доля энергии разряда, идущая на возбуждение колебательных степеней свободы молекул CO_2 и азота, максимальна [13]. Поэтому несмотря на увеличение объемного энерговклада при плотности тока больше 0.6 A/cm^2 , рост мощности генерации сдерживается снижением вклада разряда в колебательную составляющую энтальпии газа и повышением статической температуры, увеличивающей заселенность нижнего лазерного уровня [14].

Согласно результатам [12], дальнейшее повышение удельной мощности генерации в режиме комбинированной накачки возможно за счет увеличения длины газоразрядной камеры при сохранении значений плотности тока разряда и напряженности электрического поля в области максимальной эффективности.

Рассмотрим кратко возможные причины отклонения от термодинамического равновесия. В работе [7] представлены результаты экспериментальных исследований по обнаружению колебательной неравновесности азота при нагреве его в дуговом разряде, стабилизированном интенсивным вдувом газа через пористую стенку разрядного канала. В диапазоне реализованных параметров ($I = 100\text{--}300 \text{ A}$, $p_0 = (1\text{--}2) \cdot 10^5 \text{ Pa}$) превышение колебательной температуры азота в основном электронном состоянии над поступательной температурой газа составило $1000\text{--}3000 \text{ K}$. Отмечается также, что отклонение от равновесия наблюдается и в концентрациях компонентов плазмы, например электронов, существенно превышающих равновесные значения. По мнению авторов, при совмещении разрядной камеры плазмотрона с ресивером соплового аппарата можно организовать отбор газа из неравновесной зоны разряда, повысив тем самым эффективность ГДЛ. Подчеркивается, что при этом важно, чтобы расстояние от этой зоны до критического сечения сопла, где колебательная энергия замораживается, было меньше длины колебательной релаксации азота. Согласно оценке, при $T_p = 1500 \text{ K}$, $T_k = 4000 \text{ K}$ время релаксации чистого азота $0.94 \cdot 10^{-3} \text{ s}$, а длина

релаксации $28 \cdot 10^{-3}$ м (при $p_0 = 1$ МПа и скорости течения в докритической части сопла 300 м/с). Поскольку в нашем случае (подробно описанном в [9]) расстояние от плазмотрона до сопловой решетки (0.29 м), как и время сохранения неравновесности, более чем на порядок превышает длину и время колебательной релаксации азота при параметрах в предсопловой камере ($T_0 = 1300 \pm 300$ К, $p_0 = 4$ МПа), объяснение полученного результата требует привлечения принципиально иного механизма.

Наиболее вероятным механизмом в рассматриваемом случае представляется образование возбужденных молекул азота при рекомбинации атомов



где N — атомы азота, N_2 , N_2^* — молекулы азота соответственно в основном и колебательно-возбужденном состояниях.

Важной особенностью этого процесса является то, что практически вся энергия реакции (1), равная энергии диссоциации азота (9.76 eV), выделяется в виде колебательной с образованием молекул на высоких колебательных уровнях [10,15–18]. С учетом величины колебательного кванта азота (~ 0.3 eV), каждый акт реакции рекомбинации поставляет в систему около 30 квантов. В камере плазмотрона азотная плазма находится в состоянии, близком к термодинамически равновесному, с образованием значительного количества атомарного азота, который при истечении рекомбинирует, увеличивая число колебательно-возбужденных молекул N_2 , в результате чего и возникает отрыв колебательной температуры T_v от поступательной [19–21].

Реакции (1) соответствует следующее уравнение релаксации:

$$dN_2/dt = kN_2N^2 - k_{\text{dis}}N_2N_2, \quad (2)$$

где k — константа образования молекулы азота, k_{dis} — константа обратной реакции.

Пренебрегая вторым членом уравнения (2) и учитывая, что $dN_2/dt = \frac{1}{2} dN/dt$, получаем

$$N(t) = N(0)/1 + 2kN(0)N_2t. \quad (3)$$

Здесь $N(0)$, N_2 — начальная концентрация соответственно атомов и молекул азота.

При давлении 5 МПа и $T \sim 2000$ К, степени диссоциации 0.1 из (3) следует, что время установления равновесия атомов и молекул азота превышает 20 с.

Таким образом, полученные в дуге плазмотрона атомы азота при последующем их взаимодействии с молекулами в предсопловой камере способны поддерживать длительное время неравновесное состояние плазмы, приводя к отступлению температуры возбуждения примесей от газовой температуры.

В свою очередь, неравновесность по колебательной температуре и степени диссоциации азотной плазмы

способна объяснить и обнаруженную в опытах неравновесность по степени ионизации. При этом возможны по меньшей мере три канала ионизации:

взаимодействие легко ионизируемых примесей, находящихся в составе плазмы, с колебательно-возбужденными молекулами азота (колебательно-ионизационный обмен) [22];

ассоциативная ионизация колебательно-возбужденных молекул азота [16,23];

ионизация при столкновении возбужденных на электронные состояния молекул азота друг с другом или с атомарным азотом в возбужденном состоянии [24].

Принимая во внимание, что спектр излучения из предсопловой камеры и сверхзвукового канала содержит большое число элементов с низким (по сравнению с азотом) потенциалом ионизации и отсутствие азота (в спектре излучения), можно отдать предпочтение первому из названных каналов. Однако окончательный обоснованный вывод о механизме неравновесной ионизации в условиях реализованных в настоящей работе может быть сделан на основе детального количественного анализа возможных процессов, что требует дальнейших исследований.

Таким образом, полученные результаты и их предварительный анализ указывают на возможность использования плазмотронов для повышения эффективности смесительных ГДЛ за счет дополнительной колебательной неравновесности.

Сверхравновесная степень ионизации сверхзвукового потока, поддерживаемая электродуговым нагревом азота, позволяет рассматривать плазмотрон в качестве технически простого источника преионизации для быстропотоочного газоразрядного и газодинамического с комбинированной накачкой лазеров.

Список литературы

- [1] Bronfin B.R., Boedeker L.R., Cheyer J.P. // Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 16. N 5. P. 214–270.
- [2] Taran J.P.E., Charpenel M., Borghi R. Investigation of a mixing CO₂ GDL. AIAA Paper. 1973. N 73-622. 5 p.
- [3] Koichi Kasuya, Takao Kumasaka, Tashimitsu Murasaki // Output-Power-Characteristics of a CW-Gasdynamic-Laser. Jpn. J. Appl. Phys. 1973. Vol. 12. N 5. P. 771–772.
- [4] Schall W., Hoffmann P., Hugel H. // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48. N 2. P. 688–690.
- [5] Выскубенко Б.А., Демешок Е.Т., Кириллов Г.А., Колобянин Ю.В., Кормер С.Б., Ниточкин Н.А. Энергетические характеристики смесового газодинамического СО₂-лазера. II Всесоюз. конф. „Оптика лазеров“, Л., 1980. С. 72–73.
- [6] Горячев С.Б., Абросимов Г.В., Акимов В.А., Григорьев М.А., Карчевский В.И., Киселёв А.А., Орлов М.Ю., Полуэктова И.Л., Рутберг Ф.Г., Савостин А.Н., Семёнов В.Н., Сулов Ю.Ф., Тихонов Б.А., Шарков В.Ф. Экспериментальная установка ЦП — газодинамический СО₂-лазер с нагревом газа в трехфазном плазмотроне. Препринт ИАЭ-3320/7. М. 1980. 39 с.

- [7] Абакумов Б.В., Курочкин Ю.В., Пустогаров А.В., Смагин Н.Н., Тихонов Б.А., Уколов В.В. // Квант. электрон. 1979. Т. 6. № 9. С. 1903–1910.
- [8] Курочкин Ю.В., Пустогаров А.В., Уколов В.В. // Изв. СО АН СССР. Сер. технических наук. 1978. Вып. 1. № 3. С. 9–15.
- [9] Антонов Г.Г., Бородин В.С., Братцев А.Н., Голубев В.С., Глухов А.И., Знесин М.О., Павлов В.К., Рутберг Ф.Г., Шамаев С.Н. Сверхзвуковой импульсно-проточный газодинамический стенд на электродуговых подогревателях. В кн.: Мощные генераторы низкотемпературной плазмы и методы исследования их параметров. Л.: ВНИИэлектромаш, 1979. С. 3–33.
- [10] Бирюков А.С. // Тр. Физ. ин-та им. П.Н. Лебедева АН СССР. 1975. Т. 83. С. 13–86.
- [11] Кассади П.Э., Ньютон Дж.Ф., Роуз П. Новый тип смесительного газодинамического лазера. Ракетная техника и космонавтика. 1978. Т. 16. № 4. С. 29–39.
- [12] Антонов Г.Г. Исследование характеристик разряда в сверхзвуковом потоке, поддерживаемом плазмотроном. В кн.: Генераторы плазмы и системы их электропитания Л.: ВНИИэлектромаш, 1987. С. 33–38.
- [13] Басов Н.Г., Беленов Э.М., Данилычев В.А., Сучков А.Ф. // УФН. 1974. Т. 114. Вып. 2. С. 213–247.
- [14] Смирнов Б.М. // УФН. 2009. Т. 179. № 6. С. 591–604.
- [15] Гордиец Б.Ф., Осипов А.И., Шелепин Л.А. Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры. М.: Наука, 1980. 512 с.
- [16] Словецкий Д.И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. М.: Наука, 1980. 310 с.
- [17] Возбужденные частицы в химической кинетике. Сб. статей / Пер. с англ. под ред. К. Бемфорд, К.М. Типпер. М.: Мир, 1973. 320 с.
- [18] Полак Л.С. Неравновесная химическая кинетика и ее применение. М.: Наука, 1979. 230 с.
- [19] Антонов Г.Г., Александров В.Д., Бородин В.С., Велихов Е.П., Голубев В.С., Победоносцев О.А., Позубенков А.А., Рутберг Ф.Г. // ДАН СССР. 1983. Т. 269. № 4. С. 843–845.
- [20] Антонов Г.Г., Бахит Ф.Г., Бородин В.С., Велихов Е.П., Голубев В.С., Нечесов О.П., Позубенков А.А., Рутберг Ф.Г. // Тезисы докл. VI Всесоюз. конф. по физике низкотемпературной плазмы. Л.: ЛИЯФ, 1983. Т. 1. С. 381–383.
- [21] Антонов Г.Г., Бахит Ф.Г., Бородин В.С., Велихов Е.П., Голубев В.С., Нечесов О.П., Позубенков А.А., Рутберг Ф.Г. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 6. С. 1053–1059.
- [22] Бородин В.С., Павлов В.К., Рутберг Ф.Г. Возбуждение вольфрама в плазмотроне переменного тока / В кн.: Мощные генераторы низкотемпературной плазмы и методы исследования их параметров. Л.: ВНИИэлектромаш, 1979. С. 108–124.
- [23] Ачасов О.В., Жданок С.А., Рагозин Д.С., Солоухин Р.И., Фомин Н.А. // ЖЭТФ. 1981. Т. 81. Вып. 2 (8). С. 550–559.
- [24] Басиев А.Г., Высикайло Ф.И., Голубев В.С., Гурашвили В.А., Щекотов Е.Ю. Исследование несамостоятельного разряда, поддерживаемого инъекцией азота из капиллярного плазмотрона. Препринт ИАЭ-3350/7. М. 1982. 17 с.