

11. Ступоченко Е. В., Лосев С. А., Осипов А. И. Релаксационные процессы в ударных волнах. М., «Наука», 1966.
12. Jeffers W. Q., J. D. Kelly. Calculations of $V - V$ transfer probabilities in CO — CO collisions.— «J. Appl. Phys.», 1971, vol. 55, N 9.
13. Green W. N., Hancock J. K. Laser-excited vibrational energy transfer studies of HF, CO and NO.— «IEEE J. of Quantum Electronics», 1973, vol. 9, N 1.
14. Liu G. S., Mefarlane R. A., Wolga G. J. Measurement of vibrational-vibrational energy transfer probabilities in CO—CO collisions by a fast flow approximation.— «J. Chem. Phys.», 1975, vol. 63, N 1.
15. Гордиец Б. Ф., Осипов А. И., Ступоченко Е. В., Шелепин Л. А. Колебательная релаксация в газах.— «Труды Ин-та механики МГУ», 1973, № 21.
16. Galedonia G. E., Center R. E. Vibrational distribution functions in anharmonic oscillators.— «J. Chem. Phys.», 1971, vol. 55, N 2.

УДК 621.375.826

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОПЛА В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ЛАЗЕРЕ

В. Н. Макаров, Ю. В. Туник

(Москва)

В связи с применением сверхзвуковых сопел для создания ОКГ встает вопрос об оптимальных параметрах сопла и газовой смеси с точки зрения получения наибольшей инверсии населенности энергетических уровней внутренних степеней свободы молекул рабочего газа, выходной мощности генераторов.

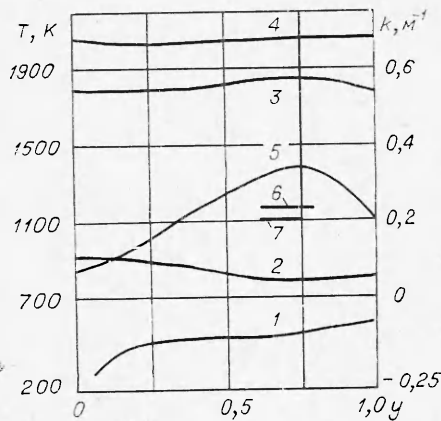
В настоящее время на основе расчетных и экспериментальных данных выработано достаточно полное представление о кинетических процессах, происходящих при истечении релаксирующей смеси газов, содержащих углекислый газ, через сверхзвуковое сопло. В [1—4] ставились и решались задачи оптимизации параметров смеси $\text{CO}_2\text{—N}_2\text{—H}_2\text{O—He}$ и формы сопла в одномерной стационарной постановке.

В данной работе изучается влияние двумерности потока в оптимальных соплах на характеристики лазера. Для расчета двумерного течения релаксирующего газа используется метод сквозного счета, предложенный в работе [5].

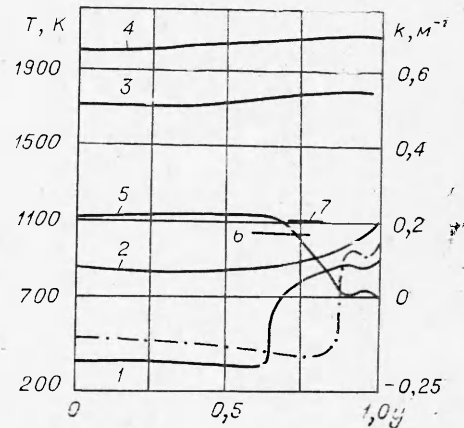
Рассматривается движение газовой смеси $\text{CO}_2\text{—N}_2\text{—He}$ с учетом кинетических процессов, описываемых тремя неравновесными температурами (см. [1, 3, 6]). Анализ размерности параметров задачи показывает (см. [5]), что течение определяется следующими параметрами:

$$T_0, p_0 L_0, \beta_j, x_j/L, h_0/L_0, L/L_0, \xi_1, \xi_2,$$

где T_0, p_0 — температура и давление торможения газа; ξ_1, ξ_2 — молярное содержание углекислого газа и азота ($\xi_3 = 1 - \xi_1 - \xi_2$ — содержание гелия); L_0 — характерная длина; h_0 — полувисота критического сечения; L — длина сопла; β_j — параметры типа углов, заданные в точках x_j/L и определяющие форму сопла. В [2, 3] проводилась оптимизация для случая, когда контур сопла задавался по формуле $y_s = h_0(1 + \omega(x'))$, где x' — расстояние по оси x , отнесенное к длине сопла L , т. е. $x' = x/L$; $\omega(x')$ — безразмерная функция, которая определяется значениями своих производных по x' — $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ в точках $x'_j = x_j/L$, равных соответственно 0; 1/9; 4/9, и условиями $\omega(0) = 0$ и $d\omega/dx'|_{x'=1} = 0$. Между точками x'_j функция интерполировалась параболой. Решение одномерной задачи не зависит от $\delta = h_0/L_0$, поэтому, если в качестве L_0



Фиг. 1



Фиг. 2

взять длину сопла L и рассматривать фиксированные значения начального давления p_0 , то список параметров, по которым происходит оптимизация, в указанном случае выглядит следующим образом: T_0 , p_0L , ξ_1 , ξ_2 , β_j .

Оптимизация удельной мощности, т. е. мощности, отнесенной к расходу газа, проводилась при фиксированном значении p_0 , и поэтому определялись T_0 , L , ξ_1 , ξ_2 , β_j . Двумерное течение полученной смеси в определенном таким образом сопле будет дополнительно зависеть от параметра δ . При малых δ течение удовлетворительно, видимо, может быть описано по одномерной теории. Увеличение δ приводит к увеличению расхода и, следовательно, суммарной выходной мощности ОКГ. Но с ростом δ двумерный характер потока проявляется в большей мере. Из формулы для контура сопла видно, что значение отношения h_0/L определяет угол θ наклона касательных к точкам контура при прочих фиксированных оптимальных параметрах T_0 , L , ξ_1 , ξ_2 , β_j :

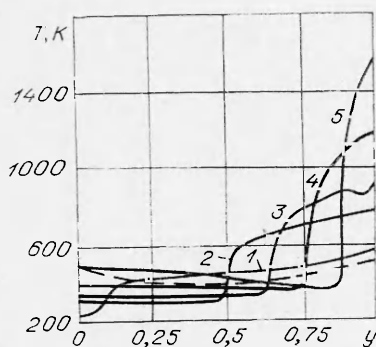
$$\operatorname{tg} \theta_j = dy_s/dx = \delta d\omega/dx' = \delta \beta_j.$$

Поэтому для выдачи практических рекомендаций по соплам и смесям следует проводить двумерные расчеты течений с изменением высоты критического сечения при фиксированных оптимальных параметрах, определенных по одномерной теории. Для иллюстрации сделанного вывода остановимся на результатах оптимизации удельной мощности при $p_0 = 10$ атм. В этом случае $\xi_1 = 10,8\%$, $\xi_2 = 59,16\%$, $\xi_3 = 30,04\%$, $T_0 = 2810\text{K}$, $L = 5,23$ см, $\beta_0 = 170,71$, $\beta_1 = 37,41$, $\beta_2 = 18,94$ [3]. Наличие большой кривизны контура может привести к резкому ухудшению параметров ОКГ при двумерном рассмотрении в связи с образованием скачков уплотнения в потоке. Поэтому вместо указанных β_j рассчитывались варианты с $\beta_0 = 64,8$, $\beta_1 = 37,41$, $\beta_2 = 18,94$, что приводит по одномерной теории к потере 10% мощности по сравнению с оптимальным значением.

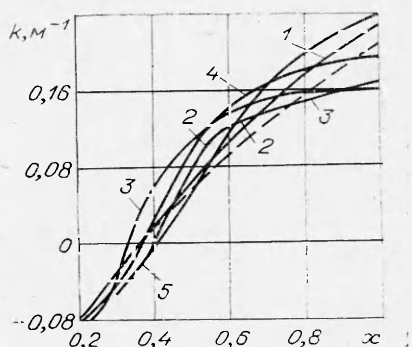
На фиг. 1 представлены результаты, соответствующие значению $\delta = 0,0066$ (при этом полуугол раствора $\theta_0 = 24^\circ$). По оси абсцисс отложено расстояние от оси симметрии сопла, причем $y = 1$ соответствует точке на контуре сопла, а $y = 0$ — оси симметрии, показаны распределения температур T , T ; (кривые 1—4) и коэффициента усиления (кривая 5) вдоль y ; здесь же указано отрезками 6 и 7 среднее по y значение коэф-

фициента усиления, а также значение k_0 , полученное в результате решения задачи о течении в одномерной постановке. Разница между средней величиной $\langle k \rangle$ и величиной коэффициента усиления k_0 невелика, и относительная разница $|\langle k \rangle - k_0|/k_0 = 13\%$. Изменение коэффициента k вдоль y связано с изменением газодинамических переменных в поперечном сечении.

На фиг. 2 приведены аналогичные результаты при $\delta = 0,01144$, что соответствует начальному углу раскрытия $\theta_0 = 36^\circ$. Степень расширения потока S в рассматриваемом случае в зависимости от величины



Фиг. 3



Фиг. 4

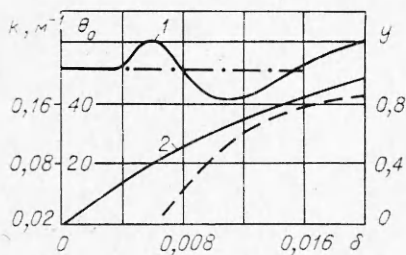
критического сечения δ меняется в виде $S = \delta 111,56$. В потоке возникает ударная волна, за которой высокая поступательная температура T . Наличие ударной волны не вызывает заметных изменений колебательных температур T_3, T_4 , при этом заметно меняется температура T_2 . Величина коэффициента усиления падает до нулевого значения около стенки сопла. Относительное отклонение $\langle k \rangle$ от k_0 в этом случае равно $|\langle k \rangle - k_0|/k_0 = 18\%$. Штрихпунктирной линией на фиг. 2 отмечено значение T в сечении $x' = 0,6$.

Представление об интенсивности скачка в зависимости от начального полуугла раскрытия θ_0 дает фиг. 3. Здесь по оси абсцисс (как и на фиг. 1, 2) отложено расстояние от оси симметрии сопла, а кривые 1—5 соответствуют распределению поступательной температуры T при значениях θ_0 , равном соответственно 24,3; 31,4; 36,1; 42,4 и 50,8°. Штриховой линией указаны значения T для максимального полуугла $\theta_0 \approx 20^\circ$, при котором в рассматриваемых условиях не возникает ударная волна. Видно, что по мере увеличения начального угла θ_0 интенсивность скачка увеличивается, а относительная координата y возникновения скачка возрастает, т. е. скачок «прижимается» к стенке сопла.

Распределение средней величины коэффициента усиления $\langle k \rangle$ вдоль оси сопла x' для тех же значений начального угла θ_0 изображено кривыми с прежней нумерацией на фиг. 4. Штриховой линией указано распределение k_0 , согласно одномерной теории.

На фиг. 5 кривая 1 построена по значениям среднего коэффициента усиления $\langle k \rangle$ в сечении $x' = 1$ в зависимости от $\delta = h_0/L$. Штрихпунктирная линия относится к значению k_0 . По кривой 2 определяются углы θ_0 для различных δ . Штриховая кривая дает ординату положения скачка уплотнения в сечении $x' = 1$.

При малых значениях δ наблюдается хорошее совпадение кривой 1 со штрихпунктирной, и на некотором участке изменения средний коэффициент $\langle k \rangle$ превосходит величину k_0 , т. е. в двумерном потоке реали-



Фиг. 5

зуются лучшие условия образования инверсии, чем получаются при одномерных расчетах. Затем происходит уменьшение коэффициента $\langle k \rangle$, что вызвано появлением ударных волн в потоке.

С ростом расхода интенсивность скачка растет, что видно из фиг. 3, и за ним резко падает коэффициент оптического усиления. Но уменьшение относительной толщины дезактивированной зоны компенсирует это падение, и среднее значение $\langle k \rangle$ на выходе из сопла растет.

Таким образом, результаты расчетов в данном случае позволяют констатировать, что практическая реализация оптимальных параметров сопла и смеси газов, полученных по одномерной теории, будет представлять большой интерес.

Поступила 12 IX 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Лосев С. А., Макаров В. Н. Оптимизация коэффициента усиления в газодинамическом лазере на углекислом газе. — «Квант. электроника», 1974, т. 1, № 7, с. 1633—1641.
2. Лосев С. А., Макаров В. Н. Многофакторная оптимизация газодинамического лазера на углекислом газе. I. Оптимизация коэффициента усиления. — «Квант. электроника», 1975, т. 2, № 7, с. 1454—1458.
3. Лосев С. А., Макаров В. Н. Многофакторная оптимизация газодинамического лазера на углекислом газе. II. Оптимизация удельной мощности генерации. — «Квант. электроника», 1976, т. 3, № 5.
4. Лосев С. А., Макаров В. Н. О мощности газодинамического лазера при высоком давлении. — ПМТФ, 1975, № 4, с. 3—7.
5. Левин В. А., Туник Ю. В. Движение релаксирующей смеси газов в двумерных плоских соплах. — «Изв. АН СССР. МЖГ», 1976, № 1, с. 118—125.
6. Лосев С. А., Макаров В. Н., Павлов В. А., Шаталов О. П. Исследование процессов в газодинамическом лазере на ударной трубе большого диаметра. — ФГВ, 1973, № 4, с. 463—473.

УДК 533.9.07

РАЗЛЕТ ПЛАЗМЕННОЙ ТОКОВОЙ ОБОЛОЧКИ

В. С. Комельков, А. П. Кузнецов, А. С. Плешанов,
И. Я. Полонский, Г. Г. Якушев
(Москва)

1. Эксперимент. Импульсный плазменный ускоритель с электродами коаксиальной геометрии [1] и емкостным накопителем энергий 25 кДж (рабочее напряжение 6 кВ, максимальный ток разряда 400 кА) генерировал плотные плазменные сгустки, выбрасываемые из ускорительного про-