

УДК 533.6.011

**ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ СОПЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА**

КИРЕЕВ В. И., МИНИН С. Н., ПИРУМОВ У. Г.

Представлены результаты численного профилирования и анализа влияния формы сопла и газодинамических параметров на характеристики газодинамических лазеров.

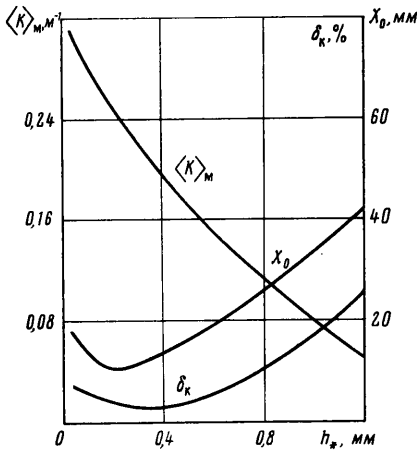
На основе исследований двумерного неравновесного течения семейства подобных сопел и сопел с различным углом наклона суживающейся части показана целесообразность выбора такой формы дозвуковой части, которая обеспечивает прямолинейную звуковую линию. Рекомендуются соотношения геометрических параметров дозвукового и трансзвукового участка сопла, обеспечивающих безотрывность течения и форму звуковой поверхности, близкую к плоской. Проведено параметрическое исследование сверхзвукового участка двух классов плоских сопел ГДЛ, построенных на базе равномерных и симметричных характеристик на выходе. На основе параметрических исследований влияния степени расширения, полного давления и температуры, а также состава газа показано, что наименьшие потери полезной колебательной энергии в резонаторной области обеспечивают сопла, построенные на базе равномерной характеристики.

Эффективность преобразования тепловой энергии в энергию когерентного электромагнитного излучения существенно зависит от геометрии сопла, определяющей свойства колебательно-неравновесного течения газовой смеси в рабочей части газодинамического лазера (ГДЛ). Поэтому в настоящее время задача поиска оптимального профиля сопла является актуальной.

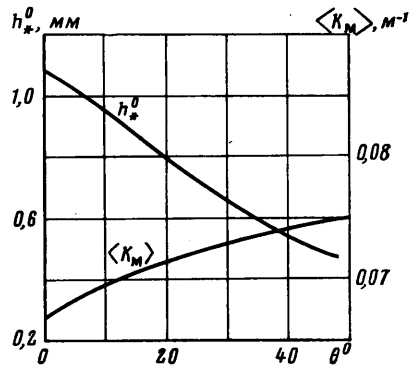
Проведенные теоретические и экспериментальные исследования течения колебательно-релаксирующего газа [1-6] позволили сформулировать основные принципы построения сопла ГДЛ: максимальное уменьшение времени пребывания газа в сопле, обеспечение отсутствия в рабочей среде ударных волн, обеспечение на выходе из сопла параллельности потока.

Статья посвящена численному параметрическому исследованию влияния геометрических и газодинамических параметров на характер неравновесных процессов, протекающих в двумерном потоке смеси газов как в дозвуковом, так и в сверхзвуковом участках плоских и осесимметричных сопел. При этом входной до- и трансзвуковой участки сопла исследуются на основе работы [6], в которой решается обратная задача [7] с учетом релаксационных процессов. Расчет профиля расширяющейся части сопла осуществляется классическим методом характеристик при решении обратной задачи по заданным параметрам потока в выходном сечении в изэнтропическом приближении [8, 9], затем в сверхзвуковой области по распределению давления вдоль трубок тока проводится расчет колебательно-неравновесного течения.

1. Рассматривается до- и трансзвуковое течение колебательно-возбужденной смеси $\text{CO}_2-\text{N}_2-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$ с мольными долями 0,0354; 0,777; 0,154; 0,0336 соответственно. Отметим, что такой состав смеси может быть получен при сгорании керосина в воздухе. Давление и температура в камере сгорания принимаются равными $P_0=17$ ата, $T_0=1310$ К, давление на выходе из сопла $P_a=0,11$ ата. Оценка качества лазерной среды производится по текущему значению доли сохраняемой полезной колебательной энергии, характеризующейся коэффициентом эффективности сопла η и коэффициентом оптического усиления K . Формулы для вычисления η и K приведены в [10].



Фиг. 1



Фиг. 2

Расчеты подобных сопел, проведенные на основе метода [6], показали, что пропорциональные уменьшение и увеличение линейных размеров оказывает существенное влияние на колебательно-релаксационные свойства потока. На фиг. 1 в зависимости от высоты критического сечения h_c приведены распределения максимального среднелинейного значения коэффициента усиления $\langle K \rangle_M$, степени его неравномерности δ_k и абсциссы местоположения $\langle K \rangle_M$, отсчитываемая от критического сечения X_0 . Осреднение K в текущем сечении осуществляется по расходу газа в этом сечении. В расчетах задавались аналитические распределения давления вдоль оси [11], обеспечивающие в минимальном сечении форму, близкую к угловой точке, а также высокую степень равномерности газодинамических параметров в выходном сечении сопла.

Из фиг. 1 видно, что $\langle K \rangle_M$ с уменьшением размера сопла увеличивается, что обусловлено увеличением темпа охлаждения рабочей смеси, приводящего к заметному повышению замороженной в потоке колебательной энергии возбужденных молекул N_2 и асимметричного типа колебаний CO_2 . Однако при очень малых h_c происходит замораживание и симметричных мод колебаний, что приводит к увеличению X_0 . Степень неравномерности $\delta_k = \delta_k(h_c)$ коэффициента усиления по характеру поведения аналогична зависимости $X_0 = X_0(h_c)$.

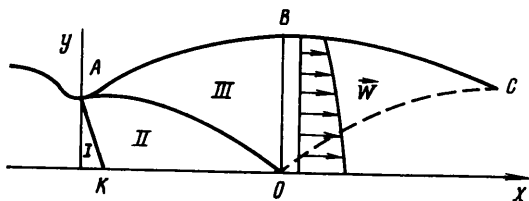
Представляет интерес исследовать влияние угла наклона суживающейся части сопла θ на течение, в котором имеют место релаксационные процессы. По результатам систематических исследований при θ , изменяющемся в диапазоне от 6° до 50° установлено, что газодинамические особенности колебательно-неравновесного течения в до- и трансзвуковой области сопла аналогичны соответствующим особенностям изэнтропического течения. Отметим его наиболее важные свойства. Величина θ значительно влияет на газодинамические и колебательные характеристики течения в сопле. Поток в окрестности критического сечения является неравномерным, звуковая линия — криволинейной. С возрастанием θ степень неравномерности возрастает, звуковая линия искривляется. При увеличении θ до некоторого предельного θ_n на стенке сопла за угловой точкой реализуется местная зона торможения, которая может привести к появлению ударных волн и при $P_2/P_1 = 1,2-1,7$ — к отрыву потока [12] (P_1, P_2 — статические давления до и за точкой отрыва). В свою очередь отрыв из-за сильного торможения потока может обусловить исчезновение инверсной заселенности колебательных уровней в газовой смеси.

На фиг. 2 представлены зависимости $\langle K \rangle_M$ и допустимой высоты h_*^0 от угла θ . При этом в качестве стенки сопла выбираются предельные линии тока, на которых зоны торможения отсутствуют. Видно, что с увеличением θ $\langle K \rangle_M$ возрастает, а допустимая высота h_*^0 уменьшается. Так, при изменении θ от 6° до 50° $\langle K \rangle_M$ возрастает на 12%, а h_*^0 уменьшается в 2,2 раза. В то же время двукратное подобное сокращение размеров сопла приводит к возрастанию $\langle K \rangle_M$ на 70% (фиг. 1).

В силу отмеченного неблагоприятного влияния возрастания θ на условия возникновения зон с обратными градиентами давления и отсутствия таких зон в плоских соплах с равномерными параметрами в критическом сечении при выборе формы дозвуковой части сопла [13] целесообразно использовать контуры сопел, обеспечивающих прямолинейную звуковую линию. При решении обратной задачи формы плоских и осесимметричных сопел Лаваля с плоской поверхностью перехода

получаются при задании вдоль центральной линии тока распределения скорости, характеризующегося нулевой производной по x в точке, где скорость потока равна скорости звука [14].

В работе проведены исследования колебательно-неравновесных течений в плоских и осесимметричных соплах с плоской и криволинейной звуковой поверхностью. На основе данных исследований установлены следующие соотношения геометрических параметров входной части сопла, обеспечивающих безотрывность течения и форму звуковой поверхности, близкой к плоской. Радиус очертания минимального сечения $R_2 \geq h$. (h — ширина или радиус критического сечения), $\theta_n \leq 70^\circ$ ($\theta_n \leq 35^\circ$); радиус сопряжения параллельного оси x и суживающего участков сопла $R_1 \geq 0,5 h_0$ ($R_1 \geq h_0$) (h_0 — высота или радиус входного участка); (значения, указанные в скобках, относятся к осесимметричным соплам).



Фиг. 3

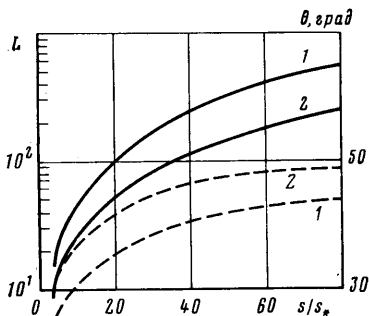
Приведенные геометрические параметры могут быть рекомендованы для выбора конкретных форм входных участков сопел ГДЛ.

2. Большое влияние на характер неравновесных процессов оказывает сверхзвуковая часть сопла. В настоящее время в практических конструкциях сопловых решеток ГДЛ обычно используется семейство сопел с угловой точкой, построенное на базе равномерной замыкающей характеристики. Однако данное семейство сопел не является семейством сопел кратчайшей длины. Более высокого темпа охлаждения газовой смеси можно достигнуть в более коротких соплах с неравномерным распределением параметров в выходном сечении. Поэтому в данной работе на основе решения обратной задачи [8, 9] классическим методом характеристик проведено параметрическое профилирование плоских и осесимметричных сопел, обеспечивающих заданные неравномерные газодинамические параметры в выходном сечении. Рассмотрено, в частности, семейство, построенное на базе симметричной замыкающей характеристики и обеспечивающее параллельность потока на выходе и отсутствие ударных волн во всем поле течения. В этом случае для решения обратной задачи профилирования сверхзвукового контура на выходе задается характеристика OC , симметричная AO и такая, что в симметричных относительно OB точках OC скорости w равны по величине, а углы наклона w к оси x противоположны по знаку (фиг. 3). При этом относительно OB реализуется симметричное и вдоль OB параллельное оси Ox течение. Для сопел ГДЛ целесообразно использовать не весь контур, а его часть AB . Длина сверхзвуковой части таких сопел совпадает с длиной разгонного участка.

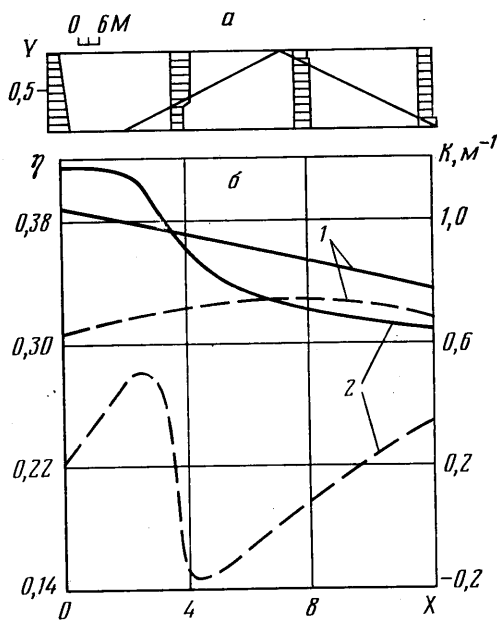
Проведено параметрическое исследование характеристик двух классов сопел, первый из которых выстраивается на базе равномерной замыкающей характеристики, а второй — на базе симметричной замыкающей характеристики. На фиг. 4 для обоих классов сопел приведены зависимости от степени расширения $S = s/s_*$ длины $L = 2L/h_*$ сверхзвуковой части (сплошные линии) и углов наклона стенок θ в области минимального сечения (пунктирные линии). Линии 1 соответствуют первому классу сопел, линии 2 — второму. Показатель изэнтропии в расчетах принимался равным 1,4. Из фиг. 4 видно, что сопла второго класса существенно короче сопел первого класса. С увеличением S различие по L возрастает и при $S > 20$ имеет место более чем двукратное сокращение L сопел второго класса. Кроме того, сопла, профилируемые на базе симметричной характеристики, имеют более высокие значения угла наклона контура в угловой точке, что обеспечивает более интенсивный разгон потока как за угловой точкой, так и на всем сверхзвуковом участке.

Для ГДЛ на смеси газов $CO_2 + N_2 + H_2O$ был проведен анализ влияния геометрических параметров исследованных классов сопел на величину коэффициента η . Рассматривались плоские сопла с $S = 25$, $h_* = 0,4$ мм и объемными долями CO_2 , N_2 , H_2O , соответственно равными $\alpha_{CO_2} = 0,12$, $\alpha_{N_2} = 0,85$, $\alpha_{H_2O} = 0,03$, при полных давлении и температуре $P_0 = 17$ ата, $T_0 = 1800$ К. Получено, что для сопел второго класса средний по сечению коэффициент η на выходе на величину 0,04 превышает соответствующее значение η для сопел первого класса. Проведены также параметрические исследования при изменении газодинамических параметров и состава смеси

в следующих диапазонах: $1 \leq P_0 \leq 30$ ата, $1200 \leq T_0 \leq 2000$ К, $0,01 \leq \alpha_{H_2O} \leq 0,08$, $0,03 \leq \alpha_{CO_2} \leq 0,22$. Проведено сопоставление для сопел обоих классов, в результате которого установлено, что коэффициент η при указанном изменении характерных величин в выходном сечении более коротких сопел на 0,02–0,04 выше соответствующего η для сопел с равномерным выходом. Однако расчеты показали, что в выходном сечении сопел данного класса реализуются существенно неравномерные газодинамические параметры. Продольная составляющая скорости и числа Маха M при удалении от оси уменьшаются, а давление и плотность увеличиваются. Так, неравномерность по числу M при $S=25$, $\gamma=1,4$ составляет около 60%. Наличие такой сильной неравномерности указанных газодинамических параметров на срезе сопла второго класса может привести к дополнительным газодинамическим возмущениям, в результате действия которых в колебательно-релаксирующем потоке за срезом сопловой решетки может быть потеряна часть колебательной энергии. Поэтому для правильного



Фиг. 4



Фиг. 5

изучения качества лазерного потока, истекающего из обоих классов сопел, в работе проведено численное исследование релаксирующего течения смеси газов за срезом сопел в резонаторной области. В качестве расчетной области, моделирующей взаимодействующие потоки, принимается область, на верхней и нижней границах которой плоскости взаимодействия заменяются эквивалентными по граничным условиям плоскими стенками прямолинейного канала.

Смешанная задача расчета изэнтропического потока в верхней половине указанной области (фиг. 5, а) по данным, полученным в выходных сечениях сопел, решается послойным методом характеристик, обладающим свойством «сквозного» счета несильных ударных волн [15]. Расчеты, проведенные без учета влияния генерации излучения, показывают, что неравномерность газодинамических параметров на срезе коротких сопел оказывает сильное влияние на течение газа в резонаторной области (см. фиг. 5, а). Неравномерные профили газодинамических параметров в сечениях, расположенных внизу по потоку, начинают выравниваться (на фиг. 5, а приведены профили чисел M), периферийная часть потока с большим давлением поджимает центральную часть и при $X=x/h_a=2,5$ (h_a — полуширина выходного сечения) из-за данного поджатия появляются условия возникновения всящей ударной волны, интенсивность которой с увеличением X возрастает.

На фиг. 5, б приведены распределения текущих коэффициентов эффективности η (сплошные линии) вдоль средней линии тока, соответствующей плоскости симметрии прямолинейного канала. Кривыми 1 и 2 на фиг. 5, б отмечены η и K для сопла, рассчитанного на базе равномерной выходной характеристики и неравномерной симметричной характеристики соответственно. Видно, что η для сопла 2 при $X=3$ становится меньше, чем η для сопла 1. С возрастанием X различие возрастает и при $X=14$ отличается на величину 0,04. Следовательно, поток смеси газов $CO_2+N_2+H_2O$, истекающий из сопла, рассчитанного на равномерные параметры на выходе в резонаторной области, имеет более высокие запасы колебательной энергии. Наличие за срезом сопла 2 ударной волны приводит к значительному уменьшению η для сопла 2 и более низким средним значениям коэффициента усиления K .

На основании проведенных численных исследований можно сделать вывод, что из двух рассмотренных в статье классов сопел ГДЛ на CO_2 с точки зрения наименьших потерь колебательной энергии в резонаторной области более эффективными являются сопла, построенные на базе равномерной характеристики, которые при наличии острой кромки на выходе из сопловой решетки обеспечивают высокую степень однородности всех газодинамических параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лосев С. А., Макаров В. Н. Многофакторная оптимизация газодинамического лазера на углекислом газе. I. Оптимизация коэффициента усиления.— Квантовая электроника, 1975, т. 2, № 7, с. 1454–1458.
2. Макаров В. Н., Туник Ю. В. Определение оптимальных параметров сопла в газодинамическом лазере.— ПМТФ, 1978, № 5, с. 23–26.
3. Солоухин Р. И., Фокин Н. А. Изменение инверсии в потоке с газодинамическими возмущениями.— Докл. АН СССР, 1976, т. 228, № 3, с. 596–599.
4. Левин В. А., Туник Ю. В. Движение релаксирующей смеси газов в двумерных плоских соплах.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1975, № 1, с. 118–125.
5. Кгаллерман М. Г., Мальков В. М., Рубан Н. А. Экспериментальное исследование течения в соплах газодинамических лазеров.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1980, № 5, с. 178–182.
6. Бреев В. В., Минин С. Н., Пирумов У. Г., Шевченко В. Р. Течение смеси газов с релаксацией колебательной энергии в плоских и осесимметричных соплах.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1977, № 5, с. 125–131.
7. Пирумов У. Г. Расчет течения в сопле Лавалы.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1967, № 5, с. 10–22.
8. Киреев В. И. О моделировании газовых струй, истекающих из реальных сопел Лавалы.— Уч. зап. ЦАГИ, 1976, т. 7, № 2, с. 143–148.
9. Киреев В. И., Пирумов У. Г. О профилировании сопел модельных систем.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1979, № 2, с. 187–189.
10. Лосев С. А. Газодинамические лазеры. М.: Наука, 1977, 335 с.
11. Колмогоров В. Ф. Численное решение обратной задачи теории сопла Лавалы применительно к двумерным неравновесным течениям совершенного газа.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1974, № 2, с. 136–142.
12. Hyde J. C., Hozack G. A., Osugi G. S. An investigation of velocity flowfields in chemical laser nozzles.— AIAA Pap., 1973, № 641, 7 p.
13. Камзолов В. Н., Пирумов У. Г. Расчетное исследование сверхзвуковой струи, истекающей из отверстия с плоскими стенками.— ПМТФ, 1967, № 2, с. 117–122.
14. Пирумов У. Г., Росляков Г. С. Течения газа в соплах. М.: Изд-во МГУ, 1978. 351 с.
15. Киреев В. И., Пирумов У. Г. Расчет стационарных сверхзвуковых течений с неравновесными химическими реакциями.— Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1980, т. 20, № 1, с. 182–190.

Москва

Поступила в редакцию
3.IV.1981

УДК 533.6.011:518.5

ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ НЕАВТОМОДЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ О ДВИЖЕНИИ ПОРШНЯ ПОСЛЕ КРАТКОВРЕМЕННОГО УДАРА

УСТИНОВ М. Д.

В статье получено приближенное решение задачи о движении поршня после кратковременного удара под действием давления газа в предположении, что параметр $\epsilon = u_0/a_0$, где u_0 — начальная скорость поршня, a_0 — скорость звука в покоящемся газе, является малым. В явном виде найдены с точностью до членов порядка ϵ^3 включительно функции, определяющие законы движения поршня и ударной волны, а также течение газа в возмущенной области.

1. Рассмотрим следующую задачу: в бесконечной цилиндрической трубе в области $r > 0$ (ось r параллельна образующей трубы), ограниченной поршнем массы m на единицу площади сечения, находится покоящийся газ, давление p_0 и плотность ρ_0 которого постоянны (форма сечения не имеет значения, поскольку ниже рассматривается одномерное течение идеального газа, в котором скорости частиц газа параллельны оси r и все параметры течения зависят лишь от r и времени t). В момент времени $t=0$ в результате удара поршень приобретает конечную скорость