

03;07;12

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ ПРИ НЕВЫСОКИХ НАЧАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© В.Н.Макаров, С.А.Лосев

Результаты оптимизации газодинамического лазера (ГДЛ) на CO_2 , содержащего в качестве рабочей среды молекулы CO_2 , N_2 и H_2O , указывают на возможность получения высоких значений удельной мощности генерации в расчете на единицу расхода газа W [1]. Например, при давлении в форкамере $p_0 \approx 10$ атм расчет подтверждает возможность получения $W = 40\text{--}50$ кВт/(кг/с). Однако получающиеся при этом оптимальные параметры не всегда могут удовлетворить изготовителя. В частности, в оптимальном режиме ГДЛ должен иметь достаточно высокие начальные температуры T_0 и давление p_0 перед входом в сопловую решетку, а оптимальные сопла должны иметь большие углы раскрытия в районе геометрической критики. Степень расширения на выходе из сопла составляет несколько десятков (иногда более ста) единиц, что предъявляет весьма высокие требования к профилированию таких сопел, поскольку появление скачков уплотнения могут существенно ухудшить характеристики ГДЛ. В оптимуме для смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ при $p_0 = 10$ атм необходимо, чтобы начальная температура T_0 была порядка 2000–2400 К.

Реализация высоких температур на входе в сопло сопряжена с большими трудностями. Отметим также, что высокие температуры предъявляют достаточно жесткие требования к материалу, который будет использоваться при изготовлении сопел. Не просто также организовывать высокие давления на входе в сопло.

При больших углах раскрытия в геометрической критике сопла с последующим переходом в плоскопараллельный поток газа, как правило, неизбежны проблемы профилирования сверхзвукового сопла с целью получения безударного потока газа.

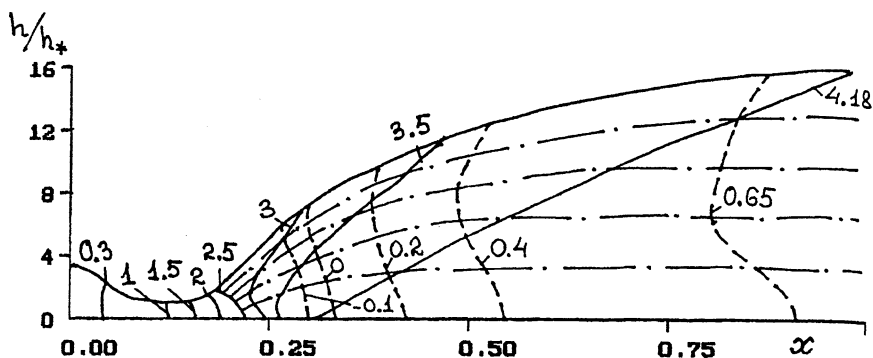
При большой степени расширения потока газа в свехзвуковом сопле (30–40 раз) возникают проблемы выброса отработанных газов в атмосферу, например с помощью диффузора, установленного за резонатором.

Таким образом, при технологическом изготовлении газодинамического лазера на CO_2 фирма-изготовитель неизбежно столкнется с реальными ограничениями на физические

| T_0, K | $\text{CO}_2, \%$ | $\text{H}_2\text{O}, \%$ | S | L_0, cm | L_1, cm | L_r, cm | t | $W, \text{Дж/г}$ | $p', \text{атм}$ | k |
|-----------------|-------------------|--------------------------|------|------------------|------------------|------------------|-------|------------------|------------------|------|
| 1400 | 8.77 | 1.18 | 28.2 | 5.7 | 4.5 | 52.0 | 0.16 | 16.2 | 0.011 | 1.16 |
| 1200 | 9.27 | 1.15 | 16.0 | 2.0 | 2.9 | 23.0 | 0.16 | 10.1 | 0.023 | 1.18 |
| 1000 | 9.66 | 0.75 | 10.1 | 1.7 | 3.3 | 10.0 | 0.137 | 5.4 | 0.042 | 1.21 |
| 900 | 9.76 | 0.56 | 7.2 | 1.5 | 3.5 | 7.0 | 0.12 | 3.2 | 0.071 | 1.27 |
| 800 | 9.80 | 0.45 | 5.1 | 1.04 | 3.6 | 5.0 | 0.095 | 1.5 | 0.114 | 1.41 |

параметры системы, которые могут существенно уменьшить мощность лазера по сравнению с "идеальными" условиями. Эти ограничения на физические параметры системы, естественно, уменьшают реальную мощность ГДЛ на CO_2 . Однако, как показывают целенаправленные расчеты, ситуация не столь драматична.

В связи с этим весьма интересным является исследование возможностей работы ГДЛ на предельно низких начальных температурах T_0 и давлениях p_0 на входе в сопло. При этом желательно одновременно решить проблемы, связанные с профилировкой оптимального сопла. Такую задачу в теоретическом плане, по-видимому, целесообразно решать в результате оптимизации ГДЛ при этих низких значениях начальных условий. Постановка задачи оптимизации нами описана в [1]. Мы будем рассматривать фиксированное значение начального давления $p_0 = 5$ атм; для заданной последовательности невысоких значений начальной температуры $T_0 = 1400, 1200, 1000, 900, 800$ К решалась задача оптимизации ГДЛ по составу; контуру сопла и характеристикам резонатора с целью получения максимальных значений удельной мощности W . Поиск оптимума осуществлялся при ограничении текущей температуры в сопле и резонаторе так, что $T > 290$ К, когда можно пренебречь процессами конденсации. Результаты решения этой задачи приведены в таблице. Здесь в первой колонке указана начальная температура T_0 . Следующие две колонки определяют молярные доли (в %) CO_2 и H_2O (остальное составляет N_2). Далее следуют три параметра, определяющих оптимальный контур сопла: S — степень расширения потока на выходе из сопла, L_0 — длина сопла, L_1 — длина плоскопараллельной части сопла, так что $dh/dx = 0$ при $L_0 \leq x \leq L_0 + L_1$. В промежутке $0 \leq x \leq L_0$ контур h задавался в виде параболы с условиями на выходе при $x = L_0$: $h/h_* = S$ и $dh/dx = 0$ (x — расстояние вдоль оси сопла, h_* — высота сопла в минимальном сечении). Следующие колонки определяют: L_r — длина резонатора, t — коэффициент пропускания зеркала, через которое выводится излучение, W — максимальное значение удельной мощности генерации в расчете на единицу расхода газа



в размерности Дж/г, p' — давление на выходе из сопла. Полагалось, что ширина резонатора равна 1 м, а коэффициент потерь на два прохода луча в резонаторе равен 0.03.

Из таблицы видно, что достаточно высокие значения удельной мощности W можно получить при относительно низких значениях начальной температуры $T_0 \sim 1200-1400$ К и давлении $p_0 \sim 5$ атм и эти значения в 3–4 раза меньше, чем предельно достижимые в этих условиях. При этом необходимы сопла с небольшой степенью расширения, что позволяет использовать сопла с большими критическими сечениями и малыми углами раскрытия. Отметим также, что при небольшой степени расширения на выходе из сопла сохраняется давление, достаточное для использования диффузора.

В колонке “k” указан коэффициент увеличения удельной мощности W при условии уменьшения коэффициента потерь в резонаторе с 0.03 до 0.01 (при сохранении неизменными остальных параметров системы).

На рисунке указаны распределения характеристик в сопле по результатам расчета в предположении о двумерном характере течения. Поле течения получено в результате решения обратной задачи сопла Лавала. В качестве распределения давления на оси использовались данные из решения задачи оптимизации (в одномерной постановке) при температуре $T_0 = 1200$ К. По оси абсцисс отложена безразмерная длина сопла. Сплошные линии на рисунке соответствуют одинаковым значениям чисел Маха M , а штриховые — распределению коэффициента усиления ($\% \cdot \text{см}^{-1}$); и эти кривые пересекают линии тока (штрихпунктир). Высота сопла в минимальном сечении равна $h_* = 1.14$ мм, а максимальный полуугол контура составляет около 30° . Максимальное значение угла контура сопла достигается чуть далее от геометрической критики; это связано с тем, что распределение

давления на оси было несколько сглажено. Видно, что на выходе из сопла получается достаточно равномерное поле и это свойство сохраняется при течении газа в резонаторе. Разница между расчетными значениями удельной мощности в предположении одномерности и двумерности газового потока составляет менее 3%.

Таким образом, приведенные данные указывают на возможность работы ГДЛ на невысоких начальных температурах $T_0 \sim 800-1400$ К. Такие низкие температуры позволяют использовать для нагрева газа теплообменник; а применение компрессора, обеспечивающего расход газовой смеси 2 кг/с при давлении 5 атм, позволяет получить непрерывно работающий ГДЛ замкнутого цикла мощностью 20 кВт.

Список литературы

- [1] Лосев С.А., Макаров В.Н. // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. № 5. С. 960.

Институт механики
Московского государственного
университета

Поступило в Редакцию
14 ноября 1995 г.