

**ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛА  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ БЫСТРОПРОТОЧНЫХ ЛАЗЕРОВ**

*А. И. Иванченко, В. В. Крашенинников, А. Г. Пономаренко,  
А. А. Шепеленко*

*(Новосибирск)*

Эффективность применения лазеров мощностью выше 1 кВт в промышленной технологии в настоящее время обоснована с технической и экономической точек зрения. Компактность и высокий КПД — важнейшие требования, предъявляемые к технологическим лазерам. Широкое применение в промышленности находят быстропроточные CO<sub>2</sub>-лазеры с самостоятельным разрядом, излучатели которых из-за низкой плотности рабочего газа имеют достаточно большие размеры.

Решение вопросов компактности и эффективности таких лазеров не может рассматриваться в отрыве от вопросов оптимального согласования характеристик прокачного устройства (ПУ) газа и замкнутого газодинамического канала (ГДК) излучателя лазера. ПУ должно обеспечить циркуляцию газа с объемным расходом, определяемым заданной мощностью лазера, в наименьших габаритах излучателя при малых уровнях шума и вибраций. Конфигурация и размеры ГДК, способ компоновки его элементов, характеристики потока газа в зоне накачки, мощность активной среды — все это в совокупности определяет газодинамическое сопротивление замкнутого канала и соответственно затраты мощности на прокачку, которые в лазерах мощностью генерации до 10 кВт составляют от 5 до 25% общей потребляемой мощности [1, 2]. В литературе имеются сведения о применении различных ПУ в быстропроточных лазерах [3—9], но не приводятся данные о характеристиках замкнутых ГДК, которыми определяются параметры ПУ. В настоящее время отсутствуют публикации, в которых взаимосвязанно рассматривается задача о выборе оптимальных параметров электрического разряда, газового потока и конфигурации проточной части ГДК.

В данной работе предлагается комплексный подход к определению основных параметров потока газа в зоне накачки и оптимальных газодинамических характеристик элементов контура и прокачного устройства.

Во многих случаях область возможных значений скорости и давления газа в каждой конкретной электроразрядной системе определяется по данным о предельных энергетических характеристиках разряда. В качестве примера рассмотрим область возможных значений параметров потока в лазере с несекционированной электродной системой [10], зависимости предельных энергетических характеристик от скорости потока газа которой, полученные в [11] и дополненные данными о генерации, представлены на рис. 1, где  $\epsilon$  — удельный энерговыход,  $P$  и  $I$  — мощность генерации и ток разряда (линии 1, 2), приведенные к метру длины электродов. Данные рис. 1 соответствуют межэлектродному зазору 7,5 см и смеси газов CO<sub>2</sub> : N<sub>2</sub> : He = 3,3 : 10 : 6,7 гПа. Видно, что для реализации устойчивого режима горения разряда при любом его токе на входе зоны накачки следует обеспечить скорость не менее заданной, так называемую пороговую скорость. По предельным характеристикам строится область устойчивых режимов разряда в координатах давление — скорость.

На рис. 2 приведены зависимости пороговой скорости  $v^*$  от давления газа  $p$  для меж-

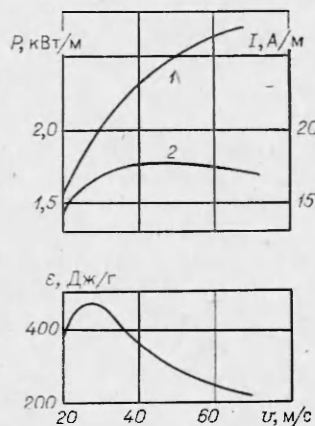
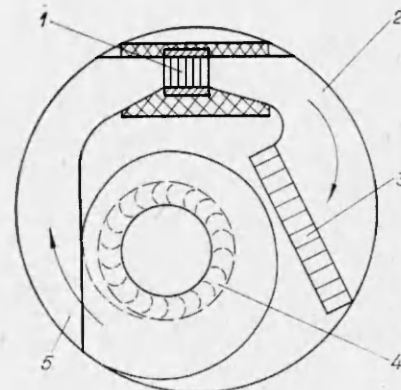
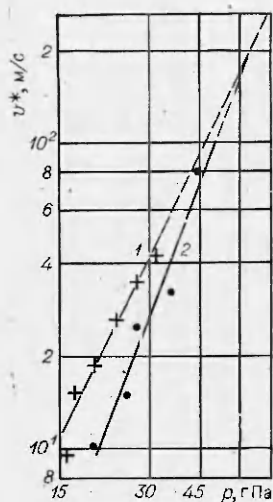


Рис. 1



Р и с. 3

Р и с. 2

электродных зазоров 5,1 и 2,8 см (линии 1, 2, штрихи означают экстраполяцию). Области значений скорости и давления газа, лежащие слева от кривых 1 и 2, соответствуют устойчивым режимам работы. Предельные режимы по давлению газа (на графике не указаны) не превышают 50—60 гПа. Из-за низких давлений и невысоких скоростей потока газа режимы течения в каналах контура лазера соответствуют низким числам Рейнольдса ( $Re = 10^2 - 10^4$ ). Рис. 1 и 2 дают полную и достаточную информацию для расчета характеристик контура и прокачного устройства. Следует, однако, подчеркнуть, что разряд по высоте канала неоднороден, энерговыход неравномерный и локальные значения скорости и температуры газа существенно могут отличаться от средних. Это приводит к дополнительным потерям полного давления — необратимому превращению кинетической энергии потока газа в давление — при течи газа в каналах зоны накачки и диффузора, устанавливаемого за ней. По графикам 2 и 1 можно определить давление и скорость газа на входе в зону накачки, однако они могут быть ограничены характеристиками применяемых ГДК и ПУ.

Рассмотрим зависимость характеристик ГДК и ПУ от скорости газового потока и величины удельного энерговыхода. Условно схема ГДК изображена на рис. 3, где 1 — зона накачки, 2 — диффузор, 3 — теплообменник, 4 — ПУ, 5 — канал, соединяющий ПУ с зоной накачки. В канале устанавливаются элементы для выравнивания профиля скорости перед зоной накачки. Характеристику ГДК можно представить в виде  $\Delta p = \xi \rho v^2 / 2$ ,  $\Delta p$  — потери давления в ГДК,  $\xi$  — коэффициент сопротивления ГДК,  $\rho$  и  $v$  — плотность и скорость газа на входе зоны накачки. Коэффициент сопротивления ГДК складывается из суммы коэффициентов сопротивлений отдельных его участков, приведенных к скорости  $v$ . Основные источники потерь давления в ГДК: зона накачки, теплообменник, диффузор, элементы для выравнивания профиля скорости перед зоной накачки и организации замкнутого цикла (повороты и др.). При определении потерь давления в ГДК будем пренебрегать изменением температуры в каналах, соединяющих зону накачки с ПУ и теплообменником с ПУ.

Оценим потери давления в зоне накачки, связанные с изменением температуры газа, при этом будем считать, что вся вкладываемая в поток газа электрическая энергия преобразуется в тепловую. Потери на трение не учитываем, что допустимо, если длина канала по направлению потока соизмерима с величиной межэлектродного зазора. В канале с подводом тепла потери давления определяются соотношением [12]

$$\Delta p_1 \approx (T_1/T - 1) \rho v^2 / 2,$$

где  $T$  и  $T_1$  — температуры газа соответственно на входе и выходе зоны на-

качки. С учетом  $T_1 \approx T + \varepsilon/c_p$  ( $c_p$  — теплоемкость рабочего газа) выражение для коэффициента сопротивления канала в области накачки примет вид  $\zeta_1 \approx \varepsilon/(c_p T)$ .

Для оценки потерь давления на теплообменнике воспользуемся соотношением между мощностью, поглощаемой теплообменником, и потерями на трение [13], которое преобразуем:

$$\Delta p_2 \approx \rho_2 v_2^2 (T_1 - T_0)/t.$$

Здесь  $T_0$  — температура газа на выходе теплообменника;  $\rho_2$  и  $v_2$  — плотность и скорость газа в каналах теплообменника;  $t$  — усредненный температурный напор между газом и стенками теплообменника. Очевидно, что для уменьшения  $\Delta p_2$  необходимо увеличивать площадь живого сечения теплообменника. Однако при этом возрастают потери давления на расширение потока в диффузоре, соединяющем область накачки с теплообменником. Поэтому потери на теплообменнике необходимо рассматривать в совокупности с потерями в диффузоре. Потери давления на расширение потока газа в диффузоре оценим, воспользовавшись формулой [14]

$$\Delta p_3 = \varphi (1 - 1/n)^2 \rho_1 v_1^2 / 2,$$

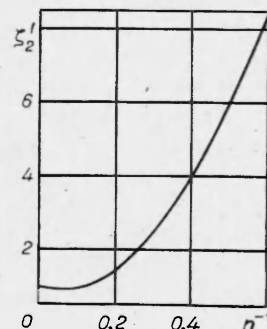
где  $\varphi$  — коэффициент (при  $\varphi = 1$  ее называют формулой Борда);  $n$  — степень расширения диффузора (отношение площадей канала широкого к узкому);  $\rho_1$  и  $v_1$  — плотность и скорость газа в узкой части диффузора. Для низких чисел Рейнольдса ( $Re < 2 \cdot 10^5$ ) в литературе не имеется данных для точного расчета  $\varphi$  [14]. С целью уменьшения габаритов лазера применяют короткие диффузоры с большими углами раскрытия (больше  $40^\circ$ ) или ступенчатые диффузоры. Для таких диффузоров, как показано в [14], хорошо согласуются с экспериментом расчеты потерь давления по формуле Борда. Поэтому примем значение  $\varphi = 1$ . В реальных условиях из-за неоднородности скорости на входе диффузора величина  $\varphi$  может быть значительно больше единицы [15]. Потери давления в диффузоре с сопротивлением на выходе можно рассматривать как сумму потерь изолированных диффузора и сопротивления [15], тогда выражение для коэффициента сопротивления системы диффузор — теплообменник имеет вид

$$\zeta_2' \approx (1 - 1/n)^2 + \zeta_T / (n^2 k^2).$$

Здесь  $k$  — коэффициент живого сечения теплообменника (отношение площади живого сечения теплообменника к площади выходного сечения диффузора);  $\zeta_T$  — коэффициент сопротивления теплообменника. Согласно рекомендациям [13, 16],  $\zeta_T \approx A \mu c_p (T_1 - T_0) / (Nu \lambda t)$ , где  $A$  — коэффициент, учитывающий форму канала и эффективность охлаждения;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости;  $Nu$  — критерий Нуссельта;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности рабочего газа.

На рис. 4 приведена зависимость  $\zeta_2'$  от  $n$ , рассчитанная для безгелиевой смеси  $CO_2 : N_2 = 1 : 3$ ,  $T_1 - T_0 = 200$  К,  $\zeta_T = 13,6$ ,  $k = 0,75$ .

Минимальное значение  $\zeta_2'$  ( $\approx 1$ ) принимает при  $n = \zeta_T / k^2 + 1$ , однако видно, что уже при  $n = 8-10$   $\zeta_2' \approx 1$ . Из этого следует, что увеличение отношения площади теплообменника к площади сечения канала в зоне накачки более чем в 8-10 раз не дает существенного выигрыша в снижении потерь давления, связанных с охлаждением рабочего газа. Таким образом, минимальное значение суммарного коэффициента сопротивления диффузора с теплообменником можно принять равным единице. Производя перерасчет на параметры потока газа на входе зоны накачки, получим  $\zeta_2 \approx 1 + \varepsilon/(c_p T)$ .



Р и с. 4

Оценим потери давления в ГДК, связанные с организацией замкнутого цикла и получением равномерного поля скоростей перед зоной накачки. Для выравнивания профиля скорости обычно используются решетки и сужающиеся участки канала. По рекомендациям [15] коэффициент сопротивления решетки должен быть равен 2—3, тогда в комбинации с диффузором за ПУ коэффициент сопротивления участка с выравнивающими элементами, приведенный к сечению канала на выходе ПУ, будет иметь значение около 0,7. По данным [16] при оптимальной конфигурации канала коэффициент сопротивления сужающихся участков может иметь минимальное значение 0,1, а поворотных 0,1—0,2. При наличии достаточно больших проходных сечений поворотных участков (в этом случае площадь входа в ПУ должна быть равна или больше площади сечения канала в зоне накачки) суммарный минимальный коэффициент сопротивления участков формирования потока, приведенный к параметрам потока перед зоной накачки,  $\zeta_3 \approx 1$ .

Суммируя коэффициенты сопротивлений отдельных элементов контура, имеем  $\zeta_{\min} \approx 2(1 + \epsilon/(c_p T))$ .

В условиях быстроточного лазера максимальная величина удельного энерговклада ограничена температурой газа около 600 К ( $T_1 \approx 2T$ ), при которой уже наблюдается заметная термоизоляция нижних лазерных уровней,  $\epsilon_{\max} \approx c_p T$ . В таком случае  $\zeta_{\min} \approx 4$ .

В замкнутом цикле рабочий режим ПУ соответствует  $p - p_0 = \zeta_0 v^2/2$ , где  $p$  и  $p_0$  — давление газа на выходе и входе ПУ. Исполнение ПУ характеризуется величиной коэффициента давления  $\pi_K = p/p_0$ . Зависимость  $\pi_K$  от параметров газового потока в зоне накачки запишем как

$$\pi_K = 1 + \frac{3v^2}{2a^2} \zeta$$

( $a$  — тепловая скорость молекулы).

Зная величину  $\pi_K$ , можно оценить температуру газа на выходе ПУ из условия адиабатического сжатия газа:

$$T = T_0 \pi_K^{(c_p - c_v)/c_p}$$

( $T_0$  — температура на входе ПУ).

Рассмотрим зависимость затрат мощности на прокачку от мощности генерации и от параметров  $\epsilon$  и  $v$ . Мощность генерации связана с параметрами потока соотношением [17]  $P = \eta \epsilon G$ , здесь  $\eta$  — электрооптический КПД, типичные значения которого для  $\text{CO}_2$ -лазеров 0,15—0,25;  $G$  — массовый расход газа через зону накачки. Мощность на прокачку можно выразить соотношением  $N = \zeta G v^2/2$ . Тогда выражение для мощности на прокачку, приведенной к мощности генерации, имеет вид

$$\frac{N}{P} = \zeta \frac{v^2}{2\eta \epsilon}$$

а для неизбежных затрат мощности на прокачку в контуре с минимальными потерями получим

$$\frac{N_{\min}}{P} \approx \left(1 + \frac{\epsilon}{c_p T_0}\right) \frac{v^2}{\eta \epsilon} \approx \frac{2v^2}{\eta c_p T}$$

Величина удельной мощности прокачки  $N/P$  характеризует эффективность использования ПУ и качество ГДК.

На рис. 5 линиями 1—3 представлены зависимости  $\pi_K$ ,  $T$  и  $N/P$  от скорости  $v$  для фиксированных значений  $\eta$  и  $\epsilon$ ,  $\zeta = 4$  и  $c_p/c_v = 1,4$ . Видно, что при  $v < 70$  м/с величина  $\pi_K$  не превышает 1,15, а температура в ПУ повышается не более чем на 10 К. Условно ПУ классифицируется по  $\pi_K$ , причем чем меньше  $\pi_K$ , тем ниже требования к его проточной части и техническому исполнению, диапазон  $\pi_K < 1,15$  относится к вентиляторам [18]. При скоростях потока больше 70 м/с существенно возрастают  $\pi_K$ ,

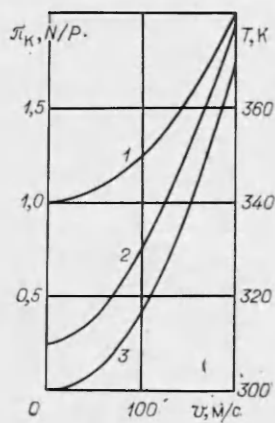


Рис. 5

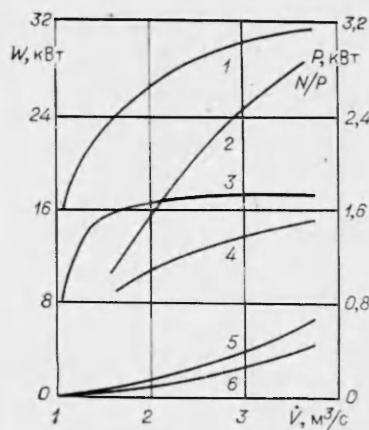


Рис. 6

$T$  и  $N/P$ . Повышение  $T$  заставляет устанавливать после ПУ дополнительный теплообменник, что в свою очередь еще увеличит  $\eta_k$  и  $N/P$ . Таким образом, использование для накачки электроразрядных устройств, в которых  $v > 70$  м/с, предъявляет повышенные требования к профилированию проточной части ПУ и ГДК. Как видим, при выборе  $v$  существуют ограничения, связанные с технической реализацией ПУ и ГДК, конкретное исполнение которых определяет надежность работы лазера и эффективность использования прокачной техники.

В реальных конструкциях с целью уменьшения габаритных размеров лазера приходится идти на увеличение полных потерь давления и в результате применять прокачную технику с более высоким значением  $\eta_k$ , затрачивая дополнительную мощность на прокачку газа.

На рис. 6 приведены результаты измерений зависимостей от объемного расхода газа через область накачки: линии 2, 4 — мощность генерации  $P$ , 1, 3 — мощность, вкладываемая в разряд,  $W$ , 5, 6 — отношение мощности, затрачиваемой на прокачку газа, к мощности генерации  $N/P$ . Мощность на прокачку газа находилась из непосредственных измерений мощности на электрическом приводе вентилятора, из которой вычитались предварительно измеренные потери на трение в механических частях вентилятора и потери в самом приводе. Результаты даны для двух лазеров, состоящих из полностью одинаковых элементов ГДК, кроме поперечных сечений каналов накачки (поперечное сечение канала накачки одного из лазеров в 1,7 раза превышало поперечное сечение второго). Графики 1, 2, 6 относятся к лазеру с поперечным сечением канала накачки, увеличенным путем использования двух идентичных электродных систем [10], находящихся в параллельных потоках газа и объединенных единым резонатором. С точки зрения получения мощности генерации и затрат мощности на прокачку газа поток газа в лазере с двумя системами возбуждения используется эффективнее, чем с одной. Выигрыш в мощности генерации связан с возможностью реализации в лазере с двумя электродными системами более высоких энерговкладов. Однако у него соотношения поперечных размеров элементов ГДК менее оптимальны,  $n = 3$ , в то время как у лазера с одной электродной системой  $n = 6$ . Поэтому выигрыш в  $N/P$  связан только с увеличением мощности генерации; он может быть значительно больше, если соотношения между элементами контура будут более оптимальными. Максимальные затраты мощности на прокачку составили 4% от мощности, вкладываемой в разряд.

Таким образом, проанализировано влияние геометрических характеристик основных элементов газодинамического контура лазера и параметров газового потока в зоне накачки на характеристики прокачного устройства в быстропроточном лазере с замкнутым циклом газового потока. Приведены области устойчивых режимов работы лазера с самостоятельным поперечным к потоку газа электрическим тлеющим разрядом,

что позволяет выбрать параметры газового потока перед зоной накачки и размеры электродной конфигурации при разработке лазеров. Получены выражения для определения неизбежных потерь мощности на прокачку. Минимальные затраты мощности на прокачку на каждый киловатт генерации могут быть реализованы при максимальных энергозатратах, ограниченных нагревом газа до предельной температуры ( $\sim 600$  К), при которой эффективность накачки снижается и КПД лазера падает. При этих энергозатратах  $\varepsilon/c_p T \approx 1$  и  $\zeta \approx 4$ .

Показано, что при условии создания контура с оптимальными размерами (с точки зрения минимальных затрат мощности на прокачку) простейшие ПУ, например вентиляторы, могут обеспечить скорость потока до 70 м/с, при этом достигается мощность  $\sim 3$  кВт с метра активной длины лазера. Дальнейшее повышение мощности лазеров такого типа может быть получено путем увеличения сечения активной среды, например, использованием двух или нескольких разрядов в параллельных потоках газа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абильтитов Г. А., Артамонов А. В. и др. Стационарный технологический  $\text{CO}_2$ -лазер мощностью 10 кВт.— Квантовая электрон., 1980, т. 7, № 11.
2. Елов В. В., Куклин В. А. и др. Исследование активной среды быстропотокового технологического лазера замкнутого цикла.— Квант. электроника, 1982, т. 9, № 8.
3. Солоухин Р. И., Вязович Е. И. и др. Использование диаметрального вентилятора в проточном лазере с замкнутой системой циркуляции газа.— ИФЖ, 1979, № 1.
4. Генералов Н. А., Зимаков В. И. и др. О возможности использования авиационного компрессора в лазерах на замкнутом цикле.— ДАН СССР, 1975, т. 221, № 2.
5. Беломестнов П. И., Иванченко А. И. и др. Электроразрядный  $\text{CO}_2$ -лазер непрерывного действия с замкнутым циклом.— В кн.: Газовые лазеры. Новосибирск: Наука, 1977.
6. Иванченко А. И., Крашенинников В. В. и др. Технологический  $\text{CO}_2$ -лазер средней мощности.— В кн.: Всесоюз. совещ. по применению лазеров в технологии машиностроения. М.: Наука, 1982.
7. Абильтитов Г. А., Голубев В. С., Лебедев Ф. В. Проблемы создания промышленных технологических лазеров мощностью 1—10 кВт.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1983, т. 47, № 8.
8. Seguin H. J. J., Dow J., Seguin V. A. Simple and economic compressors for large-volume gas transport laser systems.— Rev. Sci. Instrum., 1983, v. 54, N 10. Рус. пер.— Приборы для научных исследований, 1983, № 10.
9. Абильтитов Г. А., Велихов Е. П. и др. Мощные газоразрядные  $\text{CO}_2$ -лазеры и их применение в технологии.— М.: Наука, 1984.
10. Иванченко А. И., Крашенинников В. В., Шепеленко А. А. Быстропотоковый  $\text{CO}_2$ -лазер с несекционированными электродами.— В кн.: Всесоюз. совещ. по применению лазеров в технологии машиностроения. М.: Наука, 1982.
11. Иванченко А. И., Пономаренко А. Г., Шепеленко А. А. Предельные характеристики самостоятельного разряда  $\text{CO}_2$ -лазера замкнутого цикла.— Там же.
12. Абрамович И. И. Прикладная газовая динамика.— М.: Наука, 1969.
13. Эккерт Э. Р., Дрейк Р. М. Теория тепло- и массообмена.— М.— Л.: Госэнергоиздат, 1961.
14. Дейч М. Е., Зарянкин А. Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин.— М.: Энергия, 1970.
15. Идельчик И. Е. Потери на удар в потоке с неравномерным распределением скоростей. Выравнивающее действие сопротивления, помещенного за диффузором.— Тр. ЦАГИ, 1948, вып. 662.
16. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям.— М.: ГЭИ, 1960.
17. Абильтитов Г. А., Велихов Е. П. и др. Перспективные схемы и методы накачки мощных  $\text{CO}_2$ -лазеров для технологии (обзор).— Квантовая электрон., 1981, т. 8, № 12.
18. Черкасский В. М., Романова Т. М., Кауль Р. А. Насосы, вентиляторы, компрессоры.— М.— Л.: Госэнергоиздат, 1962.

Поступила 22/X 1985 г.