

УДК 621.375.826; 621.378.33

## ТЕРМОГИДРОДИНАМИКА $\text{CO}_2$ -ЛАЗЕРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С ЗАМКНУТЫМ ЦИКЛОМ ПОТОКА

А. И. Иванченко, А. М. Оришич, С. С. Воронцов

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Изучен вопрос о потерях давления при движении газа по замкнутому контуру, содержащему каналы, в которых к газу тепло подводится, и каналы, в которых от газа тепло отводится. Объектом, где исследуются потери давления, является  $\text{CO}_2$ -лазер с поперечным потоком.

С увеличением мощности электроразрядных лазеров с замкнутым циклом потока возрастает роль газодинамического контура. Газодинамический контур мощного  $\text{CO}_2$ -лазера непрерывного действия с поперечным потоком и поперечным разрядом имеет сходство с дозвуковой аэродинамической трубой с замкнутым контуром, но отличается от нее конфигурацией газоразрядной камеры, где происходит преобразование электрической энергии в энергию излучения и тепловую энергию.

Подходы к конструированию газодинамического контура лазера являются различными, а для выбора их схем предлагаются противоречивые критерии. Контур имеет либо высокие габаритные удельные объемы ( $3 \text{ м}^3$  на 1 кВт мощности генерации) и низкие удельные затраты мощности на поддержание циркуляции газа по замкнутому контуру (1 кВт на 1 кВт), либо высокие (до 2 кВт на 1 кВт) удельные затраты мощности и относительно низкие ( $1\text{--}1,5 \text{ м}^3/\text{кВт}$ ) габаритные удельные объемы [1–6]. Предлагаются различные, часто несовместимые критерии для выбора прокачных средств, обеспечивающих циркуляцию газа по замкнутому контуру, и аэродинамических схем газоразрядных каналов, в которых осуществляется накачка лазерной смеси газов. Результаты работ, в которых изучается вопрос о расчетах потерь давления при неизотермическом течении газа, не согласуются друг с другом. При неизотермическом движении газов движение становится неравномерным вследствие изменения плотности газов, а вместе с тем и скорости. Это вызывает потери давления на ускорение газа [7–10]. Противоречие возникает при подсчете сопротивления движению газа в целом по контуру. Например, в [4] показано, что площадь поперечного сечения потока в канале, где отводится тепло, существенно больше, чем площадь поперечного сечения потока в канале с подводом тепла, поэтому влиянием неизотермичности на коэффициент потерь в канале с отводом тепла можно пренебречь. В то же время в реальных устройствах подвод тепла, по-видимому, необязательно сопровождается потерями давления. Например, в [9] канал с подводом тепла рассматривается как тепловой конфузор.

В настоящей работе изучается вопрос о потерях давления при циркуляции дозвукового потока газа по контуру аппарата с замкнутым циклом, содержащего каналы, в которых к газу подводится тепло, и каналы, в которых тепло отводится от газа. Потери давления исследуются в  $\text{CO}_2$ -лазере с поперечным потоком. Здесь и в дальнейшем под потерями давления подразумеваются потери полного давления (давления торможения), которыми

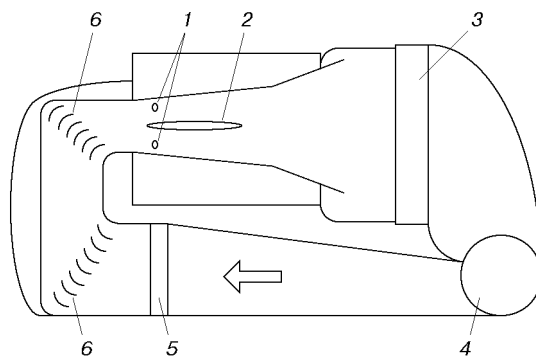


Рис. 1. Схема газодинамического контура  $\text{CO}_2$ -лазера с поперечным разрядом на базе двухмодульного электроразрядного устройства:

1 — катоды; 2 — аноды; 3 — теплообменник; 4 — вентилятор; 5 — сопротивление (теплообменник); 6 — поворотные лопатки

определяются необходимые затраты мощности на прокачку газа (см., например, [8–13]). Под неизотермическим движением подразумевается течение газа в условиях, при которых вследствие подвода или отвода тепла меняется температура торможения потока. Влияние неизотермичности на потери давления следует понимать как учет дополнительных потерь на ускорение газа при подводе (отводе) тепла.

**1. Термогидродинамика лазера с замкнутым циклом потока.** Один из возможных вариантов компоновки газодинамического контура лазера представлен на рис. 1. Вектор скорости потока в газоразрядной полости направлен поперечно направлению распространения луча оптической оси лазера и направлению тока разряда, что уменьшает число Маха, необходимое для смены газа в полости [14]. Скорость потока на переднем фронте газоразрядного канала, как правило, не превышает 60–70 м/с [1–6].

Рассмотрим контур лазера, содержащий газоразрядный канал, теплообменник и вентилятор. Газоразрядный канал и теплообменник, по которым последовательно протекает поток газа, являются нагрузкой для вентилятора. Вентилятор развивает давление, необходимое для преодоления сопротивления движению газа.

Газоразрядный канал, как правило, является каналом постоянного сечения или двумерным диффузором с углами раскрытия 7–8°. Режимы течения газа в каналах обычно соответствуют числам Рейнольдса, определяемым по гидравлическому диаметру, порядок величины которого равен  $\text{Re} \approx (4 \div 20) \cdot 10^3$ . Потери полного давления на преодоление сил трения составляют менее 10 % от потерь на ускорение газа. Процессы в газоразрядном канале в отсутствие сил трения можно описать с помощью системы уравнений для плоского канала с подводом тепла [7, 9, 10]

$$\delta(\rho v) = 0, \quad \delta(p + \rho v^2) = 0, \quad \delta[v^2/2 + c_p p / ((c_p - c_v)\rho)] = \delta q,$$

где  $\rho$  — плотность;  $v$  — скорость;  $p$  — статическое давление;  $\delta q$  — тепло, передаваемое единице массы газа. Изменение статической температуры газа  $\delta T$  составляет величину порядка температуры на входе  $T_0$ . Рассматривается дозвуковое течение, когда  $(v/c_s) \ll 1$  ( $c_s$  — скорость звука). Газ рассматривается как термически равновесный. Это правомерно, так как в газоразрядном канале одновременно происходит накачка энергии на верхние лазерные уровни, извлечение ее с коэффициентом полезного действия до 10–15 %, передача на нижние уровни и поступательным степеням свободы молекул.

Примем следующие допущения. Течение потока газа по контуру поддерживается изотропическим вентилятором. Процессы течения газа из вентилятора в газоразрядный

канал, из него в теплообменник и далее в вентилятор являются изоэнтропическими. Газоразрядный канал, где выделяется тепло, является плоским и имеет постоянное поперечное сечение. Потерями на трение в газоразрядном канале пренебрегается.

Вследствие выделения тепла давление торможения при прохождении газа через газоразрядный канал меняется на величину  $\delta p_{*q}$ . В теплообменнике давление торможения меняется на величину  $\delta p_{*Q}$  вследствие отвода тепла и на величину  $\Delta p_*$  вследствие гидромеханических потерь давления (в основном за счет преодоления сил трения). Вентилятор компенсирует потери давления в контуре. После обхода по замкнутому контуру температура газа и его энтропия не меняются.

В рамках сделанных предположений выполняются равенства

$$\delta p_{*B} = \delta p_{*q} + \delta p_{*Q}, \quad \delta T_{*q} + \delta T_{*Q} + \delta T_{*B} = 0, \quad \delta s_q + \Delta s_Q = 0. \quad (1)$$

Здесь и ниже индекс «\*» означает, что величина относится к параметрам торможения;  $\delta p_{*B}$  — изменение давления на вентиляторе;  $\delta T_{*q}$ ,  $\delta T_{*Q}$ ,  $\delta T_{*B}$  — изменение температуры газа при прохождении через газоразрядный канал, теплообменник и вентилятор соответственно;  $\delta s_q$ ,  $\delta s_Q$  — изменение энтропии на единицу массы потока газа при прохождении потока через газоразрядный канал и теплообменник соответственно. С учетом (1) вычислим потери давления.

Введем следующие обозначения. Перед входом в газоразрядный канал поток газа имеет следующие параметры:  $\rho_0$ ,  $\rho_{*0}$ ,  $v_0$ ,  $p_0$ ,  $p_{*0}$ ,  $T_0$ ,  $T_{*0}$  — плотность, скорость, давление и температура соответственно. На выходе из газоразрядного канала поток имеет параметры  $\rho_*$ ,  $p_*$ ,  $T_*$ .

В одномерном приближении процессы в газоразрядном канале и теплообменнике можно описать с помощью уравнения сохранения энергии  $\delta q = \delta h + \delta(v^2/2)$  и термодинамического соотношения

$$T \delta s_q = \delta h - \delta p / \rho, \quad (2)$$

где  $T$  — термодинамическая температура.

Соотношение (2) можно записать через параметры торможения:

$$\delta s_q = \delta q / T_* - R(\delta p_{*q} / p_*). \quad (3)$$

В (2), (3)  $\delta q$  — энергия, передаваемая единице массы потока газа;  $\delta h$  — изменение энтальпии единицы массы потока газа;  $T_*$  — температура торможения;  $R$  — газовая постоянная, Дж/(кг · К).

Для канала постоянного сечения в отсутствие гидромеханических потерь давления, обусловленных трением, выражение (2) можно преобразовать к виду [9, 10]

$$\delta s_q = \delta q / T. \quad (4)$$

Из (3) и (4) получим  $R(\delta p_{*q} / p_*) = (T_*^{-1} - T^{-1})\delta q$ .

Выражение (3) можно записать в интегральной форме

$$\delta s_q = \int_{T_{*0}}^{T_*} c_p \frac{dT_*}{T_*} - \int_{p_{*0}}^{p_*} R \frac{dp_*}{p_*}. \quad (5)$$

В теплообменнике параметры потока меняются от значений  $p_*$  и  $T_*$  на входе до значений  $p_{*0} - \Delta p_*$ ,  $T_{*0} - \delta T_{*B}$  на выходе, и изменение энтропии на единицу массы потока можно представить в виде

$$\delta s_Q = \int_{T_*}^{T_{*0} - \delta T_{*B}} c_p \frac{dT_*}{T_*} - \int_{p_{*0}}^{p_{*0} - \Delta p_*} R \frac{dp_*}{p_*}. \quad (6)$$