

УДК 533.9

**Тепловая неустойчивость тлеющего разряда
в замкнутом газовом контуре СО₂-лазера
с протяженными дисковыми вентиляторами-
теплообменниками**

**Ю.В. Афонин, А.П. Гольшев, А.М. Оришич, Ю.М. Приходько,
В.П. Фомичев**

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН*

E-mail: prich@itam.nsc.ru

СО₂-лазеры с поперечным разрядом и конвективным охлаждением газа находят все большее применение. Одним из способов повышения эффективности данного типа лазеров является увеличение скорости прокачки газа через область разряда и использование для этого диаметральных дисковых вентиляторов-теплообменников. Однако их применение сталкивается с некоторыми трудностями, связанными с взаимодействием тлеющего разряда с газовым потоком. Проведено исследование проблемы устойчивости объемного разряда в замкнутом контуре с диаметральными дисковыми вентиляторами-теплообменниками.

Ключевые слова: диаметральный дисковый вентилятор-теплообменник, СО₂-лазер, газовый контур, теплообмен.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое развитие получили СО₂-лазеры с поперечным разрядом и конвективным охлаждением рабочей газовой смеси [1]. Перекачка газа в таких лазерах осуществляется центробежными вентиляторами. Вектор скорости газа в таких системах перпендикулярен вектору электрического поля разряда. Хорошо известно, что тепловая энергия, которая может быть передана в газ, а значит и мощность излучения лазера, ограничены развитием неустойчивости объемного разряда. Флуктуации плотности или скорости газа, а также изменение условий замыкания тока на электродах приводят к переходу от объемной стадии разряда к дуговой за время порядка 10^{-3} с. Это ограничивает возможную мощность разряда и, соответственно, мощность излучения. Так, в смеси газов СО₂, воздух, Не с отношением парциальных давлений в пропорции 1:5:5 при давлении 24 Торр и при скорости потока в области разрядного промежутка 50 м/с получена мощность излучения 8,3 кВт с КПД = 11,3 %. Разрядная система включала в себя два разрядных промежутка, имеющих два трубчатых катода и общий плоский анод, охлаждаемые водой. Расстояние между катодом и анодом составляло 5,5 см, длина

электродов — 1,1 м. В работе [2] показано, что предельные энергетические характеристики объемного тлеющего разряда в такой разрядной камере возрастают с увеличением скорости потока газа. Однако, как показали эксперименты, повышение скорости потока более 50 м/с в контуре с центробежным вентилятором при числе его оборотов свыше 65 Гц невозможно, поскольку механическая прочность рабочего колеса вентилятора ограничена.

Использование диаметральных дисковых вентиляторов-теплообменников (ДДВТ), лишенных этого недостатка, в проточных CO₂-лазерах с поперечным разрядом позволяет увеличить частоту вращения ротора вентилятора и увеличить скорость газа в разрядной камере. Это является перспективным направлением развития лазерной техники большой мощности, позволяющим создать компактный газовый контур с малым газодинамическим сопротивлением и увеличить скорость потока газа через разрядный промежуток. Как показали предварительные эксперименты, в таком газовом контуре реализуется скорость потока до 100 м/с с неравномерностью по длине разрядной камеры не более 3 %, что позволяет увеличить КПД лазера и предельную достижимую мощность излучения при использовании разрядной камеры, описанной выше. В настоящей работе проведено детальное исследование проблемы устойчивости объемного разряда в замкнутом газодинамическом контуре CO₂-лазера с диаметральными дисковыми вентиляторами-теплообменниками.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И УСЛОВИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе [2] описан пример использования дисковых вентиляторов-теплообменников в проточных CO₂-лазерах. Показано, что дисковые вентиляторы-теплообменники справляются с задачей охлаждения газа и при достижении скорости газового потока 100 м/с, способны вложить в разряд мощность до 100 кВт, что позволяет получить мощность излучения на уровне 12–14 кВт при использовании разрядной камеры и резонатора, описанных выше и в работе [1]. Повышение степени охлаждения газа, и, как следствие, мощности излучения достигается благодаря тому, что в газодинамическом контуре лазера расположены протяженные дисковые вентиляторы-теплообменники, создающие поток газа по всей ширине разрядной камеры. Использование двух теплообменных каналов-газопроводов с двумя вентиляторами-теплообменниками в каждом канале для охлаждения одной общей газоразрядной камеры обеспечивает эффективную работу лазера путем двухступенчатого снижения температуры потока до уровня, обеспечивающего полное тушение возбужденных молекулярных уровней.

На рис. 1 изображена схема охлаждения исследуемого CO₂-лазера [3]. В вакуумной емкости размещены две пары дисковых вентиляторов-теплообменников 1, а также катоды и аноды разрядной камеры 2. Одна пара вентиляторов нагнетает охлажденный газ в канал 3, после чего газ нагревается в разряде 2 и по каналу 4 поступает во вторую пару вентиляторов-теплообменников, обеспечивающих основной съем тепла. Предварительно охлажденный газ по каналам 5 поступает в первую пару вентиляторов, где дополнительно охлаждается до температуры, обеспечивающей эффективную накачку активной газовой компоненты, и нагнетается в зону разряда. В такой схеме газодинамического контура дисковые вентиляторы-теплообменники обеспечивают высокую эффективность охлаждения и прокачки газа одновременно.

Разрядная камера и оптическая системы — аналогичны описанным в работе [1]. Секционирование электродов не применялось. Длина разряда поперек потока газа составляла 1,1 метра. Для определения эффективности теплообмена в газовом кон-

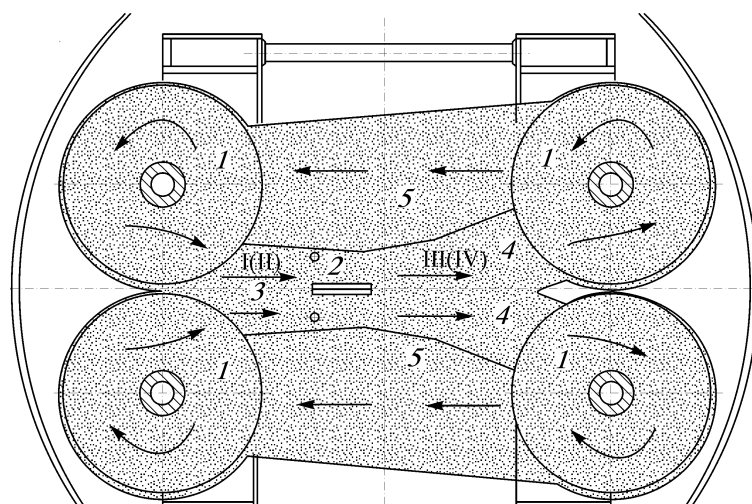


Рис. 1. Принципиальная схема замкнутого газового контура лазера.

1 — дисковые вентиляторы-теплообменники, 2 — объемный разряд, 3 — газопровод холодного газа, 4 — газопроводы горячего газа, 5 — газопроводы охлажденного газа.

туре лазера измерялась температура потока до и после разряда, а также температура охлаждающей воды на входе в установку и на выходе из нее. Проведенные измерения позволили исследовать распределение температуры газа в канале до и после разрядного промежутка. Основное внимание было уделено исследованию однородности объемного разряда и однородности температуры вдоль оси разрядной камеры. К сожалению, сильные вибрации охлаждающей пары вентиляторов не позволили длительно доводить частоту вращения роторов до 100 Гц, и основные измерения проводились при частоте 30 Гц.

Эксперимент проводился следующим образом. После включения разряда уровень мощности разряда задавался величиной тока разряда. При этом напряжение на разрядном промежутке изменялось в соответствии с его сопротивлением. После выдержки в 5–10 минут проводилось измерение температуры газа и мощности разряда в течение 20–40 минут. Установленная величина тока не менялась. Газовый контур лазера состоял из двух симметричных половин, каждая из которых имела по два дисковых вентилятора-теплообменника (см. рис. 1, 1). Для измерения температуры газа в канале 4 после разрядной камеры перед охлаждающим вентилятором размещались равномерно вдоль анода пять термопар с номерами 1–5. В канале перед разрядной камерой 3 в верхнем разрядном промежутке также были размещены пять термопар с номерами 6–10. Термопары 1 и 6 были размещены у правой стенки канала на расстоянии 100 мм, области I и III; термопары 5 и 10 — соответственно у левой стенки канала, области II и IV. В сечении верхних частей каналов 4 и 5 термопары располагались посередине.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Типичные результаты измерений приведены на графиках рис. 2 и 3. Точками обозначены моменты измерения температуры газа и мощности разряда. Кривая I (область I) соответствует измерениям термопарой 1, кривая II (область II) соответствует измерениям термопарой 5, кривая III (область III) соответствует измерениям термопарой 6, кривая IV (область IV) соответствует измерениям термопарой 10. Установившиеся значения температуры газа и мощности разряда указаны в таблице. Значения приведены только для одного разрядного промежутка. Для второго промежутка соответствующие значения аналогичны. На рис. 2 видно, что после

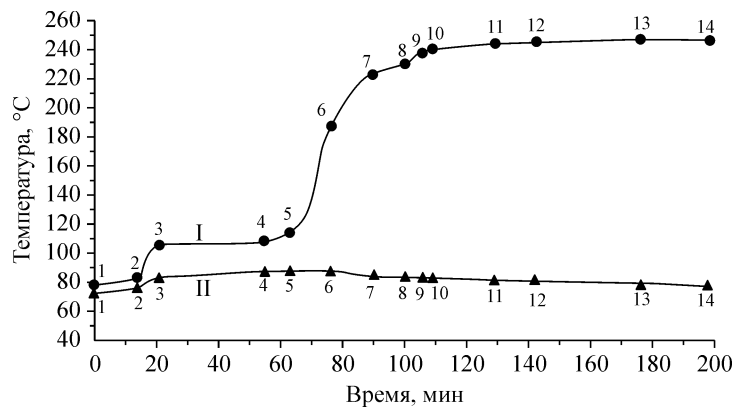


Рис. 2. Изменение температуры потока после разряда во времени.

I — температура после разряда в области I, II — температура после разряда в области II.

включения разряда наблюдается нагрев газа в течение порядка 15 минут. При этом увеличение мощности разряда приводит к увеличению температуры. Это наблюдается до точки 5. Затем динамика температуры изменяется. Начиная с точки 6 наблюдается увеличение температуры газа правой части канала (кривая I) и уменьшение температуры потока в левой части канала (кривая II) при практически неизменной общей мощности разряда. Наблюдается незначительное уменьшение напряжения на разрядном промежутке, что соответствует повышению температуры газа. Аналогичное изменение температуры наблюдается в потоке перед разрядной камерой, то есть после прохождения газом системы охлаждения (см. рис. 3, кривые III и IV). Но масштабы изменения, естественно, меньше. Важно отметить, что разряд сохраняет свойства объемного (не контрагированного) разряда, в том числе и в области повышенного энерговыделения.

На рис. 2 и в таблице можно увидеть, что температура газа после разряда в области I (кривая I) сильно отличаются от температуры в области II (кривая II), отличие до 170°C. Наблюдается локальный разогрев газа в области I и незначитель-

Таблица

№ точки	Время	Температура газа после разряда справа	Температура газа после разряда слева	Температура газа перед разрядом справа	Температура газа перед разрядом слева	$I_{\text{верх'}}$ А	$U_{\text{верх'}}$ В	W, кВт
		I	II	III	IV			
	(мин)					—	—	—
1	0	76,9	71,9	32	33,7	10	1000	10
2	14	82,1	75,5	36,4	36,5	10	980	9,8
3	21	104,6	81,9	39	38,5	13	1000	13
4	55	105	86	44	42	13	992	12,9
5	63	112,7	87,2	45,9	43,1	13	990	12,87
6	76	188,2	87,4	51,8	43,3	17	980	16,66
7	90	223	84,4	59	42,8	17	980	16,66
8	100	230	83,6	60,6	41,8	17	980	16,66
9	106	237,8	62,9	61,9	41,7	17	975	16,575
10	109	240	82,4	62,7	41,5	17	975	16,58
11	129	244	81,5	64,1	40,9	17	975	16,58
12	142	246	80,7	65,5	40,6	17	975	16,58
13	176	247,4	79,4	67,1	39,9	17	960	16,32
14	198	247,5	78,5	67,7	39,4	17	955	16,24

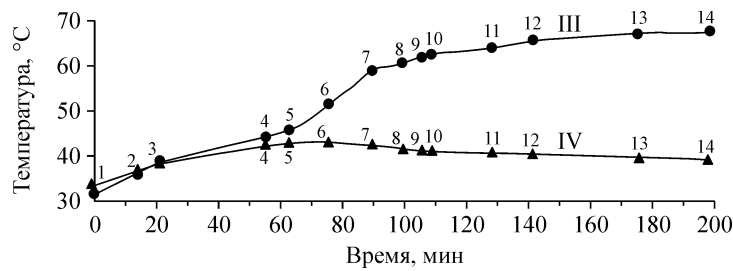


Рис. 3. Изменение температуры потока до разряда во времени.

III — температура перед разрядом в области III, IV — температура перед разрядом в области IV.

ное охлаждение в области II. Такое изменение температуры потока в канале 4 (см. рис. 1) и изменение его во времени при практически неизменной общей мощности разряда можно интерпретировать как проявление тепловой неустойчивости потока в газодинамическом контуре лазера, имеющем источник и сток энергии.

Фактически при большой $W \geq 12$ кВт весь прирост мощности поглощается в зоне развития тепловой неоднородности. На рис. 3 можно видеть, что температура газа перед разрядной камерой при мощности разряда менее 12 кВт практически одинаковая во всех точках потока, что является показателем отсутствия тепловой неоднородности, а также того, что теплообменники подавляют проявление тепловой неустойчивости.

При больших мощностях разряда проявление неустойчивости наблюдается и перед разрядной камерой. Теплообменники ослабляют ее проявление, но подавить ее полностью не могут.

Неравномерность температуры нарастала по времени относительно медленно (см. рис. 2 и 3). Характерное время нарастания температуры составляло порядка 10^3 – 10^4 с. После этого система переходила в стадию насыщения. В результате развития такой неравномерности отдельные области газового потока в разряде перехватывают на себя большую часть электрического тока, сохраняя при этом объемную стадию тлеющего разряда. Характерный размер области локализации тока составлял 15–20 см при полной длине разряда 1,1 м поперек потока.

Необходимо отметить, что давление газа в контуре оставалось постоянным. Разряд в области повышенной плотности тока, естественно, был менее устойчив к переходу в контрагированный режим, что приводило к прекращению работы лазера.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Чтобы понять природу такого теплового дисбаланса, рассмотрим структуру течения газа внутри контура лазера. Газ, приведенный в движение вращающимися дисками, движется в направлении, параллельном плоскости дисков, и попадает в следующий дисковый вентилятор, практически не меняя направления движения (рис. 4, а). Таким образом, происходит формирование струйного характера течения. Газ не перемешивается в каналах между роторами и любая тепловая неравномерность между струйками тока имеет возможность сохраняться или даже увеличиваться.

Плотность электрической мощности, поглощаемой в разряде, равна $\sigma E^2 = jE$. Поскольку в разряде использовалась протяженная электродная система, то разность потенциалов для всего разряда была одинакова. То есть, напряженность электрического поля E была постоянна вдоль разрядного промежутка. Следовательно, повышенный нагрев газа связан только с увеличением проводимости потока σ и увеличением плотности тока j . Для питания разряда использовался источник тока,

при этом полный ток разряда сохранялся. Увеличение плотности тока в одной области должно сопровождаться уменьшением плотности тока в остальных областях, что может приводить к неравномерности энерговыделения по длине разрядной камеры.

Для анализа тепловой неустойчивости воспользуемся общим подходом, рассмотренным в работе [4] для ионизационно-перегревной неустойчивости. В отличие от [4], будем рассматривать изменение температуры газа в замкнутой трубке тока, которая определяется нагревом объемным разрядом и охлаждением в холодильной системе. В качестве характеристической температуры возьмем температуру газа после холодильника T_2 . Давление во внутреннем объеме лазера поддерживается постоянным. Тепловая неустойчивость развивается только при поперечных неоднородностях. Последовательность причинных связей можно представить следующим образом. Увеличения тепловыделения и температуры газа приводят, при постоянстве давления $P = NkT_2 = \text{const}$, к уменьшению плотности газа и увеличению отношения E/N (при $E = \text{const}$), что в свою очередь приводит к росту ионизации и, следовательно, к увеличению плотности тока и тепловыделения, т. е. процесс может непрерывно нарастать. Для качественного описания этого процесса используем уравнения, аналогичные [4], для изменения средней концентрации электронов в разряде n_e и величины T_2 в замкнутой трубке газового потока длиной l и единичного сечения:

$$\frac{dn_e}{dt} = v_{\text{ion}} n_e - \beta_{\text{eff}} n_e^2, \quad (1)$$

$$lNC_p \frac{dT_2}{dt} = \Delta z \sigma E^2 - \varepsilon V_g C_p N (T_1 - T_L).$$

Здесь N — плотность, V_g — скорость и C_p — теплоемкость газа, $\sigma = n_e e^2 / m_e \nu_m$ — электронная проводимость, E — электрическое поле в разряде, T_1 — температура газа после разряда и T_L — температура охлаждающей жидкости, ε — эффективность работы холодильной системы, $v_{\text{ion}} = A \exp\left(-\frac{BN}{E}\right)$ — скорость ионизации, β_{eff} — эффективная скорость рекомбинации, Δz — характерных размер разряда в направлении потока газа.

Систему уравнений (1) необходимо дополнить соотношением для T_1 :

$$T_1 = T_2 + \frac{\sigma E^2 \Delta z}{C_p N V_g}. \quad (2)$$

Проварьируем систему уравнений (1) с учетом (2) и постоянства P и E , принимая возмущения в виде $T_2^* = T_2 + \delta T_2 \exp \gamma t$.

При $v_{\text{ion}} > \varepsilon \frac{V_g}{l}$ для инкремента тепловой неустойчивости получим

$$\gamma = -\varepsilon \frac{V_g}{l} \left[1 + \left(\frac{\partial v_{\text{ion}}}{\partial N} \right) \frac{N(T_2 - T_L)}{v_{\text{ion}} T_2} \right]. \quad (3)$$

Неустойчивость ($\gamma > 0$) возникает при

$$-\left(\frac{\partial v_{\text{ion}}}{\partial N} \right) \frac{N(T_2 - T_L)}{v_{\text{ion}} T_2} = \frac{BN}{E} \frac{(T_2 - T_L)}{T_2} > 1. \quad (4)$$

Полученные качественные результаты позволяют сделать очень важные выводы. Возникновение тепловой неустойчивости обусловлено сильной зависимостью скорости ионизации v_{ion} от плотности газа. В положительном столбе разряда возможны значения $-\left(\frac{\partial v_{\text{ion}}}{\partial N}\right)_{v_{\text{ion}}} \frac{N}{v_{\text{ion}}} \geq 10$ [4]. Эффективная работа холодильной системы является стабилизирующим фактором. Отрыв температуры на выходе холодильника от температуры охлаждающей жидкости можно представить в виде [5]

$$T_2 - T_L = \frac{(1-\varepsilon) \sigma E^2 \Delta z}{\varepsilon C_p N V_G}. \quad (5)$$

Видно, что величина $(T_2 - T_L)$ увеличивается с ростом мощности разряда и уменьшается при стремлении ε к единице. Именно это обстоятельство обуславливает пороговый характер развития неустойчивости, наблюдаемой в эксперименте. При малой мощности, согласно (5), условие развития перегрева (4) не выполняется.

При наличии замкнутых линий тока характерное время нарастания возмущения, согласно уравнению (3), определяется параметром l/V_G , т. е. временем движения газа по замкнутому контуру. Это время существенно (более чем в 100 раз) превышает характерное время развития ионизационно-перегревной неустойчивости при конвективном охлаждении газа в отсутствие замкнутых линий газового потока. В этом случае развитие сильного перегрева должно происходить за время, существенно меньшее времени прохождения газа через разряд, т. е.

$$\tau = \frac{1}{\gamma_i} < \frac{\Delta z}{V_g}, \text{ пороговая мощность существенно возрастает.}$$

Согласно [4], инкремент развития перегревной неустойчивости Ω в разрядном промежутке описывается выражением $\Omega = v_T v_i - v_F$, где $v_T = \sigma E^2 / NC_p T$ — величина, обратная времени нагрева газа

$$v_i = \frac{\partial v_{\text{ion}}}{\partial(E/N)} \frac{(E/N)}{v_{\text{ion}}} \approx \frac{BE}{N} \approx 10, \quad (6)$$

и $\tau_F = \frac{1}{v_F} = \frac{\Delta z}{V_G}$ — время конвективного выноса возмущения из разряда. Неустой-

чивость возникает, когда $10v_T \tau_F = 10v_T \frac{\Delta z}{V_g} \geq 1$.

В нашем случае из уравнения (6) инкремент развития неустойчивости можно представить в виде $\gamma \approx 10 \frac{\sigma E^2 \Delta z}{NC_p T_2 l} \approx 10v_T \frac{\Delta z}{l}$. Стабилизирующим фактором

является диффузионное охлаждение, т. е. $\tau_F \approx \Lambda^2 / \chi$, где Λ — характерный поперечный пространственный масштаб и χ — коэффициент температуропроводности.

Условие развития медленной неустойчивости $\gamma \tau_F \approx 10v_T \frac{\Delta z \Lambda^2}{l \chi} \geq 1$. Полученные

выражения позволяют сравнивать пороговые мощности разряда быстрой $W_{\text{Пор1}}$ и медленной $W_{\text{Пор2}}$ перегревных неустойчивостей: $W_{\text{Пор2}} = W_{\text{Пор1}} \frac{l}{V_g} \frac{\chi}{\Lambda^2} = 0,1 W_{\text{Пор1}}$

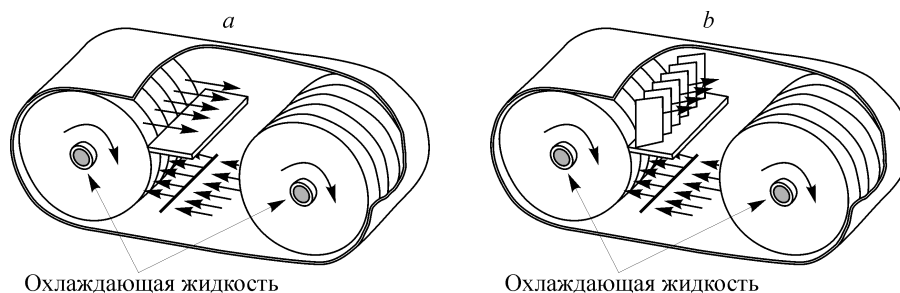


Рис. 4. Схема течения газа в контуре лазера.

(здесь взято $l = 300$ см, $\chi = 30$ см²/с, $\Lambda = 5$ см, $V_G = 5000$ см/с). Таким образом, пороговая мощность медленной неустойчивости приблизительно в десять раз меньше пороговой мощности развития быстрой неустойчивости в разряде, что хорошо совпадает с данными нашего эксперимента.

Проведенный анализ показал, что для подавления наблюдаемой медленной тепловой неустойчивости необходимо либо снизить отрыв температуры относительно охлаждающей жидкости, либо разорвать замкнутые линии тока. В работе [6] детально исследованы теплофизические характеристики дисковых вентиляторов и показано, что существенно повысить эффективность системы охлаждения технически трудно. Поэтому в настоящей работе определяющая роль струйного характера течения в развитии тепловой неоднородности потока в газодинамическом контуре исследуемого лазера проверялась введением устройства для перемешивания потока. На рис. 4 представлены два варианта организации потока в газодинамическом контуре лазера. Для наглядности изображена только одна пара вентиляторов-теплообменников (см. рис. 1). На рис. 4, *a* представлен вариант с сохранением струйного характера течения, на рис. 4, *b* — вариант с перемешиванием потока.

Для перемешивания газа были использованы жалюзи, меняющие направление потока (см. рис. 4, *b*). В результате применения перемешивания, удалось добиться однородности температуры потока перед разрядной камерой, устранить локальный перегрев и получить равномерное распределение температуры потока после разрядной камеры. Это подтвердило предположение о том, что струйный характер течения способствует проявлению тепловой неустойчивости в контуре. Введением перемешивания потока в газодинамическом тракте лазера, например, при помощи различных конфигураций жалюзи можно управлять тепловой однородностью потока и добиться устойчивой работы лазера.

ВЫВОДЫ

Впервые экспериментально обнаружен эффект медленной тепловой неустойчивости работы системы из двух диаметральных дисковых вентиляторов-теплообменников в замкнутом газовом контуре проточного СО₂-лазера. Показано, что данное явление связано с проявлением струйного характера течения в замкнутом контуре, имеющем источник энергии с положительной обратной связью и консервативные теплообменники.

Создана физическая модель, которая качественно описывает пороговые условия и характерные времена развития тепловой неустойчивости в условиях замкнутых линий тока газового потока.

Специальными мерами, обеспечивающими перемешивание газа в канале перед теплообменником, удалось преодолеть кризис теплообмена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афонин Ю.В., Гольшев А.П., Иванченко А.И. и др.** Генерация излучения с высоким качеством пучка в непрерывном CO₂-лазере мощностью 8 кВт // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, № 4. С. 307–309.
2. **Afonin Yu.V., Golyshev A.P., Orishich A.M. et al.** Investigation of energy exchange in gas-dynamic contour of the CO₂ laser with the disk fans-heat exchangers // Inter. Conf. Meth. Aerophys. Research 2007: Proc. Pt. 3. Novosibirsk, Russia. P. 3–7.
3. **Гольшев А.П., Оришич А.М., Фомичев В.П. и др.** Проточный газовый лазер // Патент РФ № 2270499. Приоритет 21.05.2004. Опубликовано в БИ № 5 20.02.2006.
4. **Райзер Ю.П.** Основы современной физики газоразрядных процессов. М.: Наука, 1980. 414 с.
5. **Иванченко А.И., Оришич А.М., Воронцов С.С.** Термогидродинамика CO₂-лазеров непрерывного действия с замкнутым циклом потока // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 1. С. 3–13.
6. **Хайдаров С.В.** Экспериментальное исследование тепло- и массообмена в диаметральных дисковых вентиляторах: Дисс. канд.техн.наук 01.02.05. Новосибирск, 2000. 126 с.

Статья поступила в редакцию 22 сентября 2008 г.