

УДК 621.375.826; 621.378.33+533.6.08

Измерение пульсаций потока в проточной части контура непрерывного электроразрядного CO₂-лазера

В.Н. Зиновьев, В.А. Лебига, А.Ю. Пак, Ю.В. Афонин, А.М. Оришич

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

E-mail: lebiga@itam.nsc.ru

Экспериментально подтверждена возможность применения термоанемометрического метода для измерения пульсаций в условиях низких давлений и малых скоростей потока газа, когда среда уже не может рассматриваться как сплошная. Использование индивидуальных тарировок в рабочих условиях позволяет применять стандартную методику определения коэффициентов чувствительности проволочных датчиков термоанемометра. Для учета влияния числа Кнудсена и, возможно, других параметров в законе теплообмена, представляемого в виде критериальной зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса, необходимы специальные дополнительные исследования. Выполнены термоанемометрические измерения распределения средних скоростей и их пульсаций в проточной части электроразрядного CO₂ лазера. Показано, что уровень пульсаций скорости в окрестности анода высок, что является следствием образования в плоскости симметрии зоны взаимодействия потоков от двух вращающихся в противоположных направлениях вентиляторов. Установка детурбулизирующей сетки между вентилятором и разрядным промежутком позволяет снизить интенсивность пульсаций до приемлемого уровня. Установлено, что при обтекании катода в следе за ним формируется вихревая дорожка с высокой интенсивностью пульсаций, влияние которых заметно в значительной части разрядного промежутка. Однако уровень пульсаций в самом промежутке не превосходит допустимых значений.

Ключевые слова: газовый лазер, разрядный промежуток, пульсации скорости, термоанемометр.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение мощности и коэффициента полезного действия технологических лазеров является комплексной задачей, решение которой требует успешного решения ряда научных, технических, конструкторских и прочих задач. В работе [1] описана схема газодинамического контура непрерывного электроразрядного CO₂-лазера с поперечным разрядом и конвективным охлаждением рабочей среды, с протяженным диаметральной дисковым вентилятором принципиально нового типа. Передача кинетической энергии от такого вентилятора потоку газа происходит при помощи сил вязкого трения в пограничных областях вращающихся дисков. Возникающая при вращении дисков центробежная сила обеспечивает транспортировку газа. Еще одно преимущество дисковых вентиляторов — большая поверхность рабочего элемента — ротора с дисками, что дает возможность совмещения в одном устройстве двух функций: нагнетание газа и теплообмен. Его

применение позволяет максимально оптимизировать газодинамический контур и существенно снизить массогабаритные показатели лазера в целом. Для эффективной работы лазера необходимо иметь в области разрядного промежутка поток газа с низким уровнем пульсаций, сведения о которых до настоящего времени для дисковых вентиляторов отсутствуют. Не исследовалось также влияние на пульсации потока газа элементов конструкции разрядной камеры, традиционно применяемых в лазерах такого типа [2].

Информация об уровне и частотных характеристиках пульсаций, генерируемых в тракте лазера при рабочих режимах, отсутствует по нескольким объективным причинам: конструктивные особенности газодинамического контура, не позволяющие провести такие измерения, высокая температура и т. д. Вызывает затруднение и выбор метода измерения характеристик потока в тракте реального лазера. Пневмометрический метод определения неравномерности поля средней скорости практически непригоден из-за низких абсолютных значений давления в газодинамическом контуре лазера и поэтому малых значений перепада статического и полного давления в трубке Пито–Прандтля. Ограничено также применение оптических методов из-за конструкции корпуса, не позволяющей поместить необходимое измерительное оборудование внутрь лазера, и низкой плотности потока, недостаточной для рассеивания света.

Типичные параметры потока в разрядном промежутке лазера также находятся за пределами традиционного использования термоанемометров для измерения средних и пульсационных характеристик потока. Поэтому был выполнен ряд методических экспериментов в специальном тарировочном вакуумном стенде для моделирования потока, создаваемого дисковыми вентиляторами при низких давлениях, а затем проведены измерения в газодинамическом контуре лазера в “холодном” режиме, т. е. при отсутствии разряда. Рабочей средой во всех экспериментах служил воздух.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Тарировочный стенд с дисковыми вентиляторами для тарировки датчиков термоанемометра показан на рис. 1. Пакет алюминиевых дисков, собранных на общем роторе, приводимом во вращение электродвигателем, создавал поток внутри прямоугольного канала сечением $48 \times 68 \text{ мм}^2$, образованного внутренними стенками

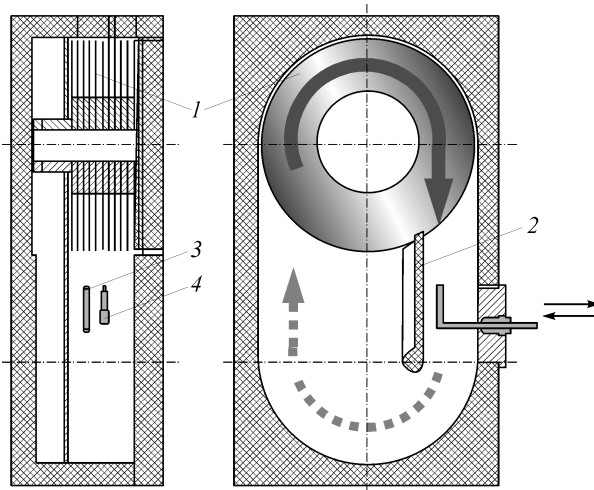


Рис. 1. Схема тарировочного стенда.

1 — диски ротора, 2 — разделительная пластина, 3 — трубка Пито, 4 — датчик термоанемометра.

Рис. 2. Схема газодинамического лазера.
 1 — корпус, 2 — дисковые вентиляторы, 3 — анод, 4 — катоды, 5 — сетка.

стенда и специальной разделительной пластиной. Требуемое давление внутри стенда задавалось и поддерживалось с помощью вакуумного насоса.

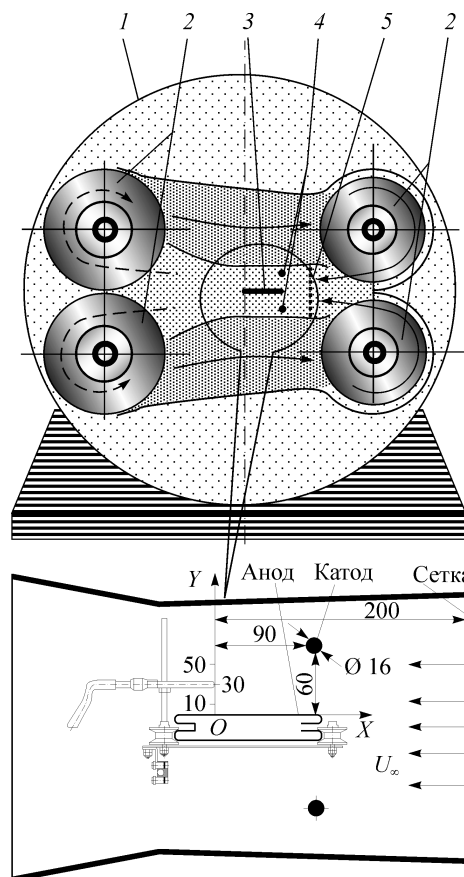
Трубка Пито и датчик термоанемометра, закрепленные на пилоне на расстоянии 17 мм между ними в одной плоскости параллельной оси ротора и на расстоянии 134 мм по потоку от оси вращения ротора (см. рис. 1), могли перемещаться в канале поперек потока перпендикулярно разделительной пластине. Статическое давление внутри стенда измерялось на одной из боковых стенок.

Для измерения средней скорости потока и продольных пульсаций скорости применялся термоанемометр DISA 55D01 с проволочными датчиками с вольфрамовой нитью диаметром 6 и 10 мкм длиной около 2 мм. После оцифровки с помощью аналого-цифрового преобразователя выходной сигнал термоанемометра передавался в персональный компьютер для дальнейшей обработки.

Это же пневмометрическое и термоанемометрическое измерительное оборудование использовалось при изучении характеристик потока в газодинамическом контуре лазера с дисковыми вентиляторами. Схема лазера и установки датчиков в разрядном промежутке показана на рис. 2, а, б соответственно. Поток внутри газодинамического контура лазера создавался с помощью находящихся в герметичном корпусе 1 дисковых вентиляторов 2 диаметром дисков 450 мм и шагом между дисками 20 мм. Скорость потока задавалась частотой вращения роторов вентиляторов. В месте расположения анода 3 и катодов 4 канал имеет прямоугольную форму в плоскости Y-Z размерами $104 \times 1200 \text{ мм}^2$. Ось X совпадает с вектором скорости, ось Y направлена поперек потока и перпендикулярна вектору скорости, а ось Z параллельна оси вращения вентилятора, начало координат находится на поверхности анода в плоскости симметрии разрядного промежутка относительно оси Y. Два катода диаметром $D = 16 \text{ мм}$ располагаются симметрично сверху и снизу относительно анода.

Датчик термоанемометра и трубка Пито, закрепленные совместно на вертикальной стойке, устанавливались на расстоянии 90 мм за катодом на различных расстояниях от поверхности анода (по координате Y) и перемещались вдоль анода (по координате Z) с помощью подвижной тележки, на которой была закреплена стойка.

В заключительной серии экспериментов перед разрядным промежутком лазера на расстоянии 387 мм от оси вентиляторов устанавливалась капроновая сетка 5 с размером ячейки $4,5 \times 4,5 \text{ мм}^2$ и диаметром нитей 0,4 мм.



МЕТОДИКА ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Чувствительность датчика термоанемометра к параметрам потока (скорости, плотности и температуре) определяется эмпирическими законами теплообмена между нагретой нитью и потоком газа, которые не являются универсальными, а зависят от параметров потока (чисел Маха M , Рейнольдса Re и др.), а также от конструктивных особенностей самого датчика. Тепловыми потерями в тоководы, к которым прикрепляется нить, потерями на излучение и т. п., как правило, пренебрегают, создавая условия, при которых они достаточно малы.

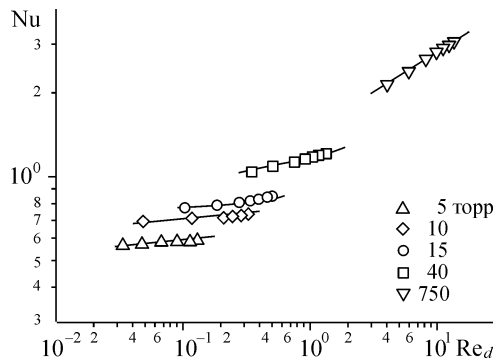
Для датчиков с нитью длиной l более 200 диаметров d в условиях сплошной среды законы теплообмена достаточно хорошо исследованы и могут быть представлены в критериальной форме, аналогичной закону Кинга

$$Nu = A + B Re_d^n, \quad (1)$$

где Nu — число Нуссельта, Re_d — число Рейнольдса, определенное по диаметру d , n — показатель степени ($n = 0,5$ в законе Кинга), A и B — эмпирические коэффициенты, определяемые, как правило, из экспериментов.

В условиях настоящих исследований из-за низкой плотности газа в тракте лазера необходимо принимать во внимание возможное влияние числа Кнудсена Kn на теплообмен. Так, числа Кнудсена, вычисленные по диаметру нити $d = 10$ мкм и параметрам потока, находятся в диапазоне $0,2 < Kn_d < 1,6$, что соответствует режимам со скольжением или переходным режимом. Увеличение диаметра нити с целью уменьшения числа Кнудсена нецелесообразно, поскольку при этом значительно увеличивается тепловая инерция датчика термоанемометра.

Для выяснения справедливости и возможности применения соотношений в виде уравнения (1) и определения коэффициентов, входящих в это уравнение, были проведены тарировки датчиков термоанемометра в стенде, показанном на рис. 1, как при низких (5...40 торр), так и при атмосферном давлении. Полученные в результате таких тарировок данные в критериальной форме $Nu(Re_d)$ представлены на рис. 3. Видно, что данные, полученные для различных давлений внутри стенда, нельзя представить в виде некоторой единой зависимости $Nu(Re_d)$ с одинаковыми значениями показателя степени n и коэффициентов A и B (см. уравнение (1)). Одной из наиболее вероятных причин этого может быть влияние числа Кнудсена, изменяющегося для приведенных данных, как было указано выше, на порядок. Влияние числа Маха и других параметров также может быть существенным. Это согласуется с данными работы [3], в которой в виде зависимости $Nu(Re_d)$ собраны, обобщены и проанализированы многочисленные теоретические и экспериментальные результаты разных авторов, полученные в широком диапазоне определяющих



параметров (M , Kn) для теплообмена прямых круговых цилиндров различного диаметра, установленных перпендикулярно вектору скорости. Как получено при тарировках (см. рис. 3), наклон зависимости $Nu(Re_d)$ уменьшается по мере снижения давления, что также согласуется с данными, приведенными в [3], где при

Рис. 3. Тарировка датчика термоанемометра.

низких давлениях наклон меньше, чем при давлении, равном атмосферному. Определение эмпирического закона теплообмена, учитывающего влияние числа Кнудсена и, может быть, других дополнительных факторов для датчиков, применяемых в настоящих исследованиях, требует специальных параметрических исследований в тщательно контролируемых условиях.

Поэтому для рабочих режимов течения, соответствующих параметрам потока при измерении пульсаций и числам Рейнольдса по диаметру нити датчика $Re_d = 0,13 \dots 1,1$, использовалась индивидуальная тарировка датчиков термоанемометра при получении информации о средних характеристиках потока и возмущений в тракте лазера. Из-за отсутствия альтернативы измерение перепада давления в трубке Пито и статического давления при тарировке термоанемометрических датчиков осуществлялось с помощью наклонного U -образного манометра, что не могло обеспечить достаточно высокую точность определения средней скорости потока, необходимую для корректного вычисления коэффициента чувствительности датчика термоанемометра, но давало информацию об относительных изменениях скорости. При этом следует заметить, что точность определения чувствительности датчика термоанемометра не оказывает влияния на значения относительных пульсаций скорости, так как коэффициенты чувствительности сокращаются при вычислении отношения средней и пульсационной составляющих скорости. Из-за технических и методических трудностей измерение пульсаций скорости ограничивалось лишь ее продольной компонентой без применения линеаризаторов даже при относительно больших значениях пульсаций. Тем не менее, полученные экспериментальные данные дают достаточно объективную картину распределения пульсаций в проточной части лазера, что позволяет использовать эти данные для улучшения характеристик потока в разрядном промежутке.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Основные результаты, приведенные ниже, были получены в проточной части лазера для нескольких фиксированных положений датчика термоанемометра по координате Y при давлении воздуха 10 торр и частоте вращения роторов дисковых вентиляторов 70 Гц.

Распределения средней скорости и относительных пульсаций скорости по оси Z (вдоль хода луча лазера), измеренные датчиком термоанемометра на расстояниях 10, 30 и 50 мм от анода, приводятся на рис. 4 (светлые символы) и рис. 5 соответственно. Видно, что измеренные вдоль анода (по координате Z) значения средней скорости изменяются поперек разрядного промежутка незначительно для разных значений Y (см. рис. 4). При этом наблюдается высокий уровень

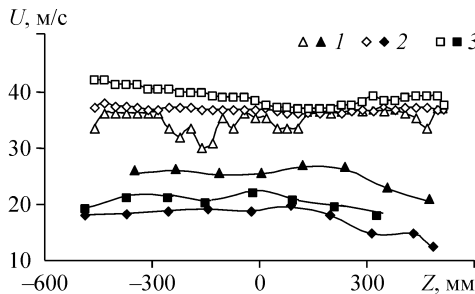


Рис. 4. Распределение средней скорости
Символы: светлые — без сетки, темные — с сеткой. $Y = 10$ (1), 30 (2), 50 (3).

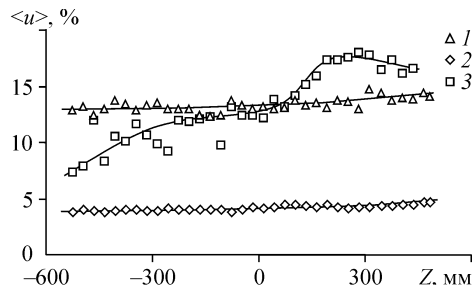


Рис. 5. Распределение пульсаций скорости при отсутствии сетки.
 $Y = 10$ (1), 30 (2), 50 (3).

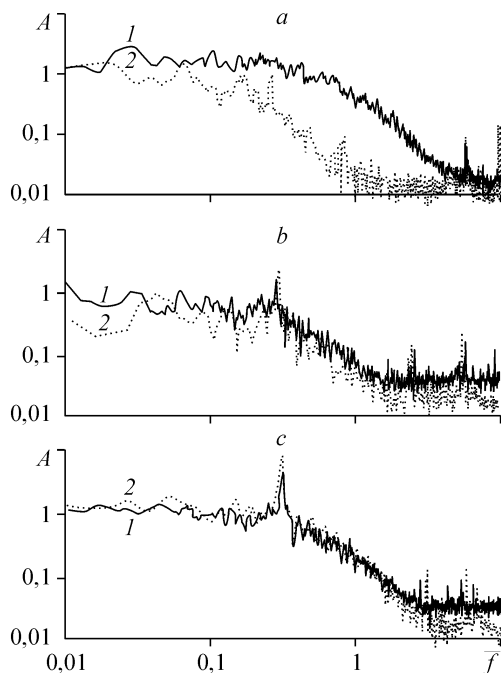


Рис. 6. Спектры пульсаций в тракте лазера.

1 — без сетки, 2 — с сеткой. $Y = 10$ (a), 30 (b), 50 (c).

пульсаций скорости вблизи как анода, $Y = 10$ мм, так и катода, $Y = 50$ мм, (см. рис. 5). В последнем случае имеет место также и значительная неравномерность в распределении пульсаций скорости по координате Z . Это, возможно, вызвано тем, что датчик термоанемометра находился в окрестности границы следа за цилиндрическим катодом.

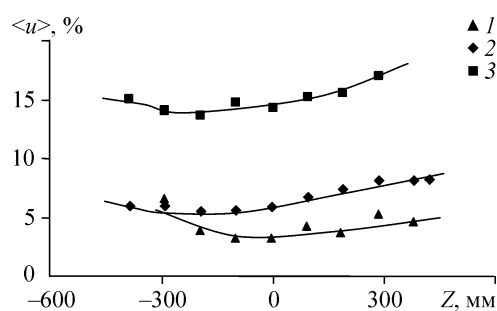
Вблизи анода ($Y = 10$ мм) уровень пульсаций скорости вдоль координаты Z практически постоянен и равен приблизительно 13–14 %. Высокий уровень пульсаций может быть следствием того, что форми-

рование течения в окрестности анода происходит в результате взаимодействия потоков, создаваемых двумя встречно-вращающимися вентиляторами (см. рис. 1), и формированием зоны взаимодействия этих двух потоков.

Записанные реализации выходного пульсационного сигнала термоанемометра использовались для получения амплитудных частотных спектров, которые представлены на рис. 6 (по оси абсцисс отложена безразмерная частота $\bar{f} = fD/U$.) Частотные спектры пульсаций в значительной части разрядного промежутка не имеют каких-либо особенностей. Однако при $Y = 30$ мм в спектрах пульсаций появляется пик на частоте $f \approx 700$ Гц, интенсивность появления которого увеличивается с приближением к катоду по координате Y (см. рис. 6, a–c), что свидетельствует о наличии локализованного источника пульсаций. Эти частоты соответствуют вихревой дорожке Кармана за поперечно обтекаемым цилиндром с характерной безразмерной частотой, равной числу Струхалия $Sh = 0,28 \pm 0,03$ для всех исследованных в настоящей работе параметров потока, что согласуется с результатами расчетов работы [4] и экспериментов работы [5], в которых было показано, что возмущения потока в окрестности цилиндра и влияние вихревой дорожки Кармана могут распространяться на достаточно обширную область течения, как в поперечном, так и в продольном направлениях, включая зоны вверх по потоку от цилиндра.

Стабильность электрического разряда зависит от степени однородности скорости потока в зоне разряда и оказывает определяющее влияние на предельную мощность, вкладываемую в разряд, а следовательно, на мощность излучения лазера. При этом пульсации плотности могут снизить мощность лазера из-за рассеяния излучения, но в данном случае пульсациями плотности можно пренебречь, поскольку течение можно считать несжимаемым. В то же время пульсации скорости оказывают сильное влияние на стабильность электрического разряда, механизм неустойчивости которого описан в работе [2]. Поэтому важно обеспечить относительно низкую (порядка 5 %) интенсивность пульсаций скорости. Однако, как видно из измерений, приведенных на рис. 5, интенсивность пульсаций скорости в зоне разряда оказалась в несколько раз выше допустимой.

Рис. 7. Распределение пульсаций скорости при установленной сетке.
 $Y = 10$ (1), 30 (2), 50 (3).



Применение детурбулизирующих сеток для выравнивания потока и снижения уровня пульсаций исследовано достаточно подробно, например, в работе [6] в которой также даны некоторые рекомендации по выбору оптимальных геометрических характеристик сеток.

Для экспериментального определения воздействия сетки на поток и ее эффективности для снижения уровня пульсаций в газодинамическом тракте лазера между дисковыми вентиляторами и разрядным промежутком устанавливалась сетка 5, как показано на рис. 2. Несмотря на выбор сетки с достаточно высокой проницаемостью (около 83 %), из-за потерь от гидравлического сопротивления средняя скорость потока в проточной части лазера заметно уменьшилась при тех же оборотах дискового вентилятора (темные символы на рис. 4).

Результаты измерения пульсаций скорости при установленной сетке приведены на рис. 7, из которого следует, что интенсивность пульсаций продольной составляющей скорости в большей части разрядного промежутка заметно снизилась (до уровня 3÷5 % в районе анода), хотя вне резонаторной зоны за катодом (при $Y = 50$ мм) высокая интенсивность пульсаций сохраняется. Поскольку влияние пульсаций в следе за катодом распространяется на разрядный промежуток, вероятно, придание сечению катода более обтекаемой формы может предотвратить образование вихревой дорожки Кармана. Следует также отметить, что характер течения за катодом при рабочем режиме лазера может существенно измениться из-за высокой температуры газа в окрестности катода.

Эффективность применения сетки для снижения пульсаций вблизи анода подтверждается также и частотными спектрами пульсаций скорости, приведенными на рис. 6, где они сопоставляются со спектрами при отсутствии сетки. Видно, что в окрестности анода ($Y = 10$ мм) достигается максимальное подавление пульсаций практически во всем диапазоне частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально подтверждена возможность применения термоанемометрического метода для измерения пульсаций в условиях низких давлений и малых скоростей потока газа, когда среда уже не может рассматриваться как сплошная. Использование индивидуальных тарировок в рабочих условиях позволяет применять стандартную методику определения коэффициентов чувствительности проволочных датчиков термоанемометра. Для учета влияния числа Кнудсена и, возможно, других параметров в законе теплообмена, представляемого в виде критериальной зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса, необходимы специальные дополнительные исследования.

Выполнены термоанемометрические измерения распределения средних скоростей и их пульсаций в проточной части электроразрядного CO_2 -лазера. Показано, что уровень пульсаций скорости в окрестности анода превышает допустимый. Высокая интенсивность этих пульсаций является следствием образования

в плоскости симметрии зоны взаимодействия потоков от двух вращающихся в противоположных направлениях вентиляторов. Установка детурбулизирующей сетки между вентилятором и разрядным промежутком позволяет снизить интенсивность пульсаций до приемлемого уровня.

Установлено, что при обтекании катода в следе за ним формируется вихревая дорожка с высокой интенсивностью пульсаций, влияние которых заметно в значительной части разрядного промежутка. Однако уровень пульсаций в самом промежутке не превосходит допустимых значений.

Для повышения эффективности электроразрядных лазеров расположение катода и анода в резонаторной области следует выбирать с учетом распределения пульсаций скорости, отдавая предпочтение зоне с наименьшим уровнем пульсаций для размещения анода. В этом случае, возможно, не нужно будет прибегать к мерам по снижению пульсаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Afonin Yu.V., Filev V.F., Fomin V.M., Golyshev A.P., Malikov A.G., Orishich A.M., Prikhod'ko Yu.M., and Fomichev V.P. Space-saving electric-discharge CO₂ laser of high (up to 14 Kw) radiation power, with convective cooling of the working medium and gas pumping by an extended disc fan // Proc. of ICMAR 2007, Novosibirsk, Russia, 5-10 Feb. 2007. Pt. II. P. 9–13.
2. Афонин Ю.В., Гольшев А.П., Оришич А.М., Приходько Ю.М., Фомичев В.П. Генерация излучения с высоким качеством луча в непрерывном CO₂-лазере мощностью 8 кВт. // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16. № 3. С. 519–527.
3. Baldwin L.V., Sandborn V.A., Laurence J.C. Heat transfer from transverse and yawed cylinders in continuum slip and free molecule air flows // J. of Heat Transfer. Trans. of the ASME. 1960. Vol. 82. P. 77–86.
4. Крайко А.Н., Пьянков К.С. Течение идеального газа с отрывными зонами и нестационарными контактными разрывами сложной формы // Изв. РАН, МЖГ, 2006, № 5. С. 41–54.
5. Zinoviev V.N., Lebiga V.A., Pak A.Yu. Experimental investigation of flow fluctuations around the cylinder at high subsonic velocities // The II Europ. Conf. for Aerospace Sciences (EUCASS), July 1-6, 2007. Brussels.
6. Репик Е.У., Соседко Ю.П. Управление уровнем турбулентности потока. М.: Физматлит, 2002. 244 с.

Статья поступила в редакцию 2 июня 2010 г.