

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОЧНЫХ ГАЗОВЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Вопросам разработки преобразователей мощности лазерного излучения посвящено значительное число работ [1]. В то же время остается нерешенной задача контроля энергетических параметров непрерывного лазерного излучения сверхвысоких уровней мощности. Основная проблема состоит в тепловом или иного рода разрушении материалов, применяемых в преобразователях. В связи с отсутствием надежных преобразователей непрерывного лазерного излучения инфракрасного диапазона для плотностей потока мощности более $1,5 \times 10^7$ Вт/м² перспективно использование проточных газовых калориметрических преобразователей постоянного давления. В них применяются газы с низким коэффициентом поглощения (менее 10^{-2} м⁻¹) при малых скоростях потока (менее 0,40 м/с). Однако в таком режиме характеристики преобразователя могут быть существенно нелинейными, изменяться под действием естественной конвекции и иных факторов. Несмотря на то что газовые калориметры используются давно [1; 2], вопросы, связанные с работой проточных газовых калориметров для измерения мощности лазерного излучения, а также выбором их оптимальных конструкций, в литературе не отражены. Нет рекомендаций по выбору параметров приемной камеры, оптимальных параметров газового поглотителя.

Исследуем проточные газовые калориметры в целях выяснения их особенностей и определения рекомендаций по выбору их параметров. Нестабильность последних во времени и в пространстве, изменение под действием мешающих факторов затрудняют экспериментальные исследования таких преобразователей. В связи с этим целесообразно разработать математическую модель, которая отражала бы их основные особенности и позволила провести комплексные исследования.

Математическая модель. Пусть преобразователь представляет горизонтальную открытую приемную камеру, через которую прокачивается поток поглощающего газа. Контролируемое излучение дальней зоны распространяется вдоль преобразователя также в горизонтальном направлении. Работа газовых калориметров может быть описана полной системой уравнений газодинамики. Очевидно, что ее решение даже в одномерном случае крайне громоздко и не позволяет достичь поставленных целей. Задача усложняется еще и тем, что учет температурной зависимости плотности, теплопроводности, коэффициента поглощения приводит к нелинейным уравнениям, а характер процессов в известных случаях применения преобразователей — как минимум к двумерной пространственной модели. Между тем исходная задача существенно упрощается, если учесть особенности работы преобразователей — небольшие скорости потока и постоянство среднего дав-

ления за время измерений, однородность потока в объеме взаимодействия. Кроме того, очевидно можно пренебречь динамической вязкостью поглощающего газа. Существенен вопрос о выборе характера распределения скоростей в объеме преобразователя. На первом этапе предположим, что процесс формирования естественной конвекции происходит независимо от наличия продольной (горизонтальной) скорости потока поглотителя, на него не оказывают влияния теплоотдача на боковых поверхностях приемной камеры и наличие продольных градиентов температуры в самом поглощающем газе. В этом случае влияние естественной конвекции можно свести к появлению дополнительного стационарного распределения скоростей потока в приемной камере, значение которых зависит от мощности контролируемого

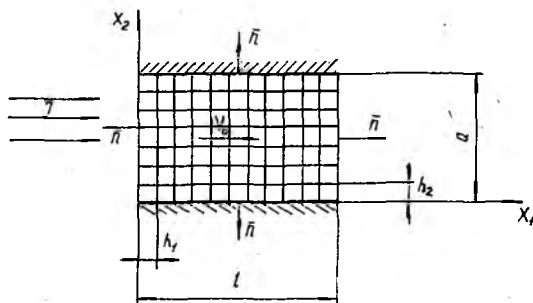


Рис. 1

излучения. Принятие описанной модели для естественной конвекции позволяет произвести оценки сверху на ее влияние, и потому достаточно грубое допущение о стационарности распределения скоростей конвекции для наших целей несущественно. Учитывая форму приемной камеры преобразователя, такое распределение в первом приближении можно описать следующими уравнениями:

$$V_{\Gamma} = V_{\kappa}(1 - 2y/a); \quad V_{\text{в}} = V_{\kappa}2y/a, \quad y < a/2;$$

$$V_{\text{в}} = V_{\kappa}(1 - y/a), \quad y > a/2;$$

где V_{Γ} , $V_{\text{в}}$ — горизонтальная и вертикальная составляющие скорости конвекции; V_{κ} — амплитуда скорости конвекции; y — вертикальная координата. Амплитуду скорости естественной конвекции в первом приближении запишем в виде [3]

$$V_{\kappa} = \left(\frac{2\beta P g}{\rho C_p T} \right)^{1/3},$$

где ρ — плотность газа; C_p — его теплоемкость при постоянном давлении; T — абсолютная температура газа; g — ускорение свободного падения; β — коэффициент поглощения контролируемого излучения; P — мощность излучения. Для воздуха при нормальных условиях ($\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$, $C_p = 10^3 \text{ Дж/кг. К}$, $T = 297 \text{ К}$) при коэффициенте поглощения $\beta = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ и мощности излучения $P = 10^5 \text{ Вт}$

имеем $V_k \sim 0,03$ м/с. Продольную исходную составляющую скорости потока будем считать постоянной и равномерно распределенной по сечению преобразователя. Учитывая направление естественной конвекции и прокачки поглотителя, задача может быть представлена двумерной математической моделью. Положим, что характерный размер преобразователя вдоль горизонтальной оси — l , вдоль вертикальной — a . Контролируемое лазерное излучение распределено равномерно по сечению преобразователя и не взаимодействует с его стенками (рис. 1). Согласно изложенному исходная задача упрощается и может быть представлена нестационарной двумерной математической моделью в виде уравнения теплопроводности с учетом эффекта движения среды [4]:

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \sum_{\alpha} \kappa_r \frac{\partial^2 T}{\partial X_{\alpha}^2} + \sum_{\alpha} C_p V_{\alpha} \frac{\partial T}{\partial X_{\alpha}} - \beta J,$$

$$T = T(X_1, X_2, t); 0 \leq X_1 \leq l; 0 \leq X_2 \leq a; 0 \leq t \leq t_{\max};$$

$$T(X_1, X_2, 0) = T_0(X_1, X_2) = 0; \quad (1)$$

$$\kappa_{ст} \left. \frac{\partial T}{\partial X_2} \right|_{X_2=0} = -\gamma_0 T; \quad \kappa_{ст} \left. \frac{\partial T}{\partial X_2} \right|_{X_2=a} = \gamma_0 T;$$

$$T(0, X_2, t) = T_0(X_1, X_2) = 0; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial X_1} \right|_{X_1=l} = 0.$$

Здесь ρ — плотность поглотителя, зависящая от температуры и давления; X_1, X_2 — горизонтальная и вертикальная координаты; V_1, V_2 — горизонтальная и вертикальная составляющие скорости потока; J — плотность потока мощности лазерного излучения; γ_0 — коэффициент теплоотдачи с боковой поверхности преобразователя; $\kappa_r, \kappa_{ст}$ — теплопроводность газа и стенок преобразователя; t_{\max} — максимальное время измерений. Вид коэффициентов уравнения (1) носит сложный, зависящий от температуры характер, что определяет его нелинейность. В работе [5] рассматривалась температурная зависимость коэффициента поглощения атмосферы на различных длинах волн лазерного излучения. На основе экспериментальных данных определена функциональная связь пропускания с параметрами атмосферы

$$P_{\lambda} = \exp \{ -C_{\lambda} Z [K_1 a T^n (1 + \alpha P) + K_2 a^2 \exp(H/T)] \}, \quad (2)$$

где a — абсолютная влажность, г/м³; P — общее давление, Па; Z — оптическая трасса, м; параметры подгонки: $K_1 = 0,22 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-3/2}$; $K_2 = 0,82 \cdot 10^{-3} \text{ м}^5 \cdot \text{кг}^{-2}$; $n = 1,5$; $\alpha = 1,95 \text{ Е} \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$; $H = 2066 \text{ К}$; $C_{\lambda} = 1$ для линии Р20 (10,591 мкм). Данная зависимость аппроксимирует имеющиеся экспериментальные данные с точностью до 3,5 % и может быть использована для расчета поглощения лазерного излучения в атмосфере. Воздух представляет случай наиболее сложной газовой смеси, поэтому использование уравнения (2) для расчета коэффициента поглощения вполне оправдано. В отличие от оптико-акустических преобразователей температурная зависимость коэффициента поглощения в проточных газовых калориметрах весьма существенна. Зависимостью удельной теплоемкости от

температуры можно пренебречь. Плотность аппроксимируется функцией вида

$$\rho = \rho_0 \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T}.$$

Здесь ρ_0 — значение плотности при нормальной температуре и давлении. Коэффициент теплопроводности в диапазоне температур 200 — 1000 К с погрешностью 1 — 2 % запишем в виде $\kappa = 0,0012 + 0,0808 \cdot 10^{-3}T + 0,0321 \cdot 10^{-6}T^2 - 0,0942 \cdot 10^{-9}T^3 + 0,0468 \cdot 10^{-12} \times T^4$.

В области преобразователя зададим пространственно-временную сетку с шагами h_1, h_2, τ по координатным направлениям X_1, X_2 и вре-

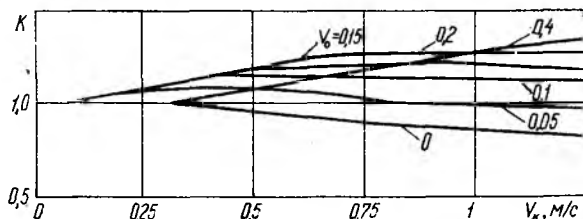


Рис. 2

мени. При этом $h_1 = l/N_1, h_2 = a/N_2, \tau = t_{\text{макс}}/N_3$, где N_1, N_2, N_3 — количество шагов по направлениям X_1, X_2 и времени. Координаты любого узла сетки следующие: $X_{1i} = ih_1; i = 0, 1, \dots, N_1; X_{2j} = jh_2; j = 0, 1, \dots, N_2; t = k\tau; k = 0, 1, \dots, N_3$. Для расчета на ЭВМ уравнение (1) аппроксимировалось локально-одномерной схемой [4].

Результаты исследований. Так как скорости потока в проточных газовых калориметрах невелики, необходимо рассмотреть влияние естественной конвекции на их характеристики. На рис. 2 представлена зависимость относительного коэффициента преобразования от скорости естественной конвекции. В области скоростей потока до 0,2 м/с наличие естественной конвекции, которая в основном зависит от мощности контролируемого излучения и коэффициента поглощения газа, может существенно изменять коэффициент преобразования (до 20 %) и соответственно вносить погрешности в измерения. На практике влиянием естественной конвекции можно пренебречь уже при соотношении скорости потока к скорости конвекции $\gamma \sim 1$. В этом случае максимальная возникающая погрешность не превысит 3 %. При значении $\gamma \sim 2$ она снижается до 0,5 %.

Проведены исследования зависимости относительного коэффициента преобразования от средней температуры среды. При скоростях потока до 0,2 м/с наблюдается переходный участок, на котором проявляется совместное действие теплопроводности и конвекции. Так как зависимость коэффициента поглощения от температуры носит характер убывающей экспоненты, влияние температуры на характеристику преобразования будет определяться тем, на какой участок этой зависимости попадает текущее значение температуры. Для ма-

лых скоростей потока (больших мощностей излучения) приращения температуры велики и текущее ее значение (исходное плюс приращение) попадает на участок с малой крутизной. В случае больших скоростей потока — наоборот. Этим объясняется повышение температурной погрешности с увеличением скорости потока до 0,2 м/с. При скоростях потока более 0,2 м/с характер зависимости определяется характером изменения с температурой коэффициента поглощения. При неустойчивости температуры $\Delta T = \pm 2\text{K}$ максимальная температурная погрешность составляет $\pm 3,4\%$. Установлено, что определяющее влияние на нелинейность оказывает зависимость коэффициента поглощения от температуры. В этом случае аналогичной зависимостью остальных параметров потока можно пренебречь.

При исследовании изменения коэффициента преобразования от среднего давления среды установлено, что даже при неустойчивости последнего ± 30 мм рт. ст. (примерно 4 %) возникающая погрешность не более 0,6 %. Увеличение скорости потока до 1,2 м/с несколько повышает погрешность, однако и в этом случае она менее 0,8 %. Изменение коэффициента преобразования с давлением в указанном диапазоне можно считать линейным. По сравнению с оптико-акустическими преобразователями данная погрешность почти на порядок меньше.

Газовые калориметрические преобразователи характеризуются неустойчивостью своих параметров. В частности, замена одного газа другим даже при постоянном коэффициенте поглощения излучения может изменить коэффициент преобразования, если их теплопроводности будут различны. Установлено, что влияние последней зависит, кроме того, от характера изменения коэффициента поглощения от температуры. Для модели, описанной ранее, влиянием изменений коэффициента теплопроводности можно пренебречь при скоростях потока V_0 более 0,2 м/с. Если поглощение остается постоянным в процессе измерений, то аналогичным влиянием нельзя пренебречь и при значении $V_0 \sim 1,6$ м/с. С увеличением теплопроводности поглотителя коэффициент преобразования уменьшается.

Таким образом, выбор рабочих параметров и режимов газовых преобразователей мощности лазерного излучения необходимо проводить на основе достижения приемлемого компромисса между коэффициентом преобразования и соответствующей погрешностью.

Список литературы: 1. Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения / Под ред. А. Ф. Котюка. М., 1981. 288 с. 2. Quel E., Hemptinne X., Fayt A., Hemptinne M. Methode simple pour la mesure de l'energie d'un laser CO_2 de 100 watts // Annales de la Societe Scientifique de Bruxelles. 1969. 83(III). P. 388—390. 3. Смит Д. К. Распространение мощного лазерного излучения. Тепловое искажение пучка // Тр. ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектронике. 1977. 65, № 12. С. 59—103. 4. Самарский А. А. Теория разностных схем. М., 1983. 616 с. 5. Исследование поглощения излучения перестраиваемого CO_2 лазера водяным паром в диапазоне 9—11 мкм / Арфьев В. Н., Погадаев Б. Н., Сизов Н. И. // Квантовая электроника. 1983. 10, № 3. С. 496 — 502.

Поступила в редколлегию 25.03.87