

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ЭНЕРГИИ В КОНУСНЫХ НАГРУЗКАХ ОПТИЧЕСКИХ КАЛОРИМЕТРОВ

Е. Я. Говорун, Н. И. Зинченко, В. М. Кузьмичев

Х а р ь к о в

Нагрузки в форме круговых конусов широко применяются в измерителях импульсной энергии и непрерывной мощности оптических квантовых генераторов [1, 2]. Учет распределения поглощенной энергии в конусной нагрузке позволяет решить вопрос о рациональном размещении датчиков температуры на внешней поверхности конуса и определить верхний предел энергии в импульсе, которая не приводила бы к разрушению нагрузки.

Распределение плотности поглощенной энергии для конусной нагрузки с зеркальным коэффициентом отражения может быть определено при помощи законов геометрической оптики с учетом зависимости коэффициента отражения от поляризации и угла падения излучения для каждого из последующих отражений.

Рассмотрим поглощающий конус с углом полуоткрыва ω и длиной образующей ρ_1 (рис. 1), внутрь которого параллельно оси конуса входит однородный пучок оптических лучей с энергией E_0 . Рассматривая последовательные отражения одного из крайних лучей пучка в точках 1, 2, 3... , легко получить из геометрических построений следующие формулы для угла скольжения α_i и удаления точки i -го отражения ρ_i от вершины конуса:

$$\alpha_i = (2i - 1) \omega; \quad (1)$$

$$\rho_i \sin \alpha_i = \text{const.} \quad (2)$$

Первые отражения для остальных лучей пучка, расположенных ближе к оси конуса, проходят под тем же углом, что и отражения крайних лучей; при этом энергия до второго отражения равномерно

распределится по всей поверхности конуса с образующей ρ_1 . Последующие отражения с $i = 2, 3, \dots, N$, где $N = \frac{\pi}{2\omega}$ — число отражений луча до выхода из конуса, дадут дополнительное поглощение на конических поверхностях с образующими ρ_i . Используя (2), можно найти выражение для площади конической поверхности, на которой лучи испытывают i -отражение

$$S_i = S_1 \left(\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_i} \right)^2, \tag{3}$$

или

$$S_i = \frac{S_0}{\sin \omega} \left(\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_i} \right)^2,$$

где S_1 и S_0 — площади поверхности конуса и входного отверстия конуса соответственно.

Энергия, поглощаемая при каждом из отражений, связана с коэффициентами предшествующих отражений и может быть определена способом индукции.

Предположим, что в результате первого отражения на поверхности конуса S_1 рассеивается энергия $E_1 = E_0 (1 - R_1)$, после второго отражения — на S_2 $E_2 = E_0 (1 - R_2) R_1$, после третьего — на S_3 $E_3 = E_0 (1 - R_3) R_1 R_2$ и т. д. После i -го отражения на поверхности конуса S_i будет рассеяна энергия

$$E_i = E_0 (1 - R_i) \prod_{j=1}^{i-1} R_j, \tag{4}$$

где R_i — энергетический коэффициент i -го отражения.

Можно показать, что для совокупности лучей, равноудаленных от вершины кругового конуса, выполненного из материала с оптическими постоянными n и k , энергетический коэффициент отражения равен среднему из коэффициентов отражений для ортогональных поляризаций луча [3].

$$R_i = \frac{1}{2} (R_{s_i} + R_{p_i}), \tag{5}$$

где

$$R_{s_i} = \frac{(a_i - \sin \alpha_i)^2 + \sigma_i^2}{(a_i + \sin \alpha_i)^2 + \sigma_i^2};$$

$$R_{p_i} = R_{s_i} \cdot \frac{(a_i - \cos \alpha_i \operatorname{ctg} \alpha_i)^2 + \sigma_i^2}{(a_i + \cos \alpha_i \operatorname{ctg} \alpha_i)^2 + \sigma_i^2};$$

$$a_i = \frac{1}{\sqrt{2}} [V(n^2 - k^2 - \cos^2 \alpha_i)^2 + 4n^2 k^2 + (n^2 - k^2 - \cos^2 \alpha_i)]^{\frac{1}{2}},$$

$$b_i = \frac{1}{\sqrt{2}} [V(n^2 - k^2 - \cos^2 \alpha_i)^2 + 4n^2 k^2 - (n^2 - k^2 - \cos^2 \alpha_i)]^{\frac{1}{2}},$$

α_i определяется из (1).

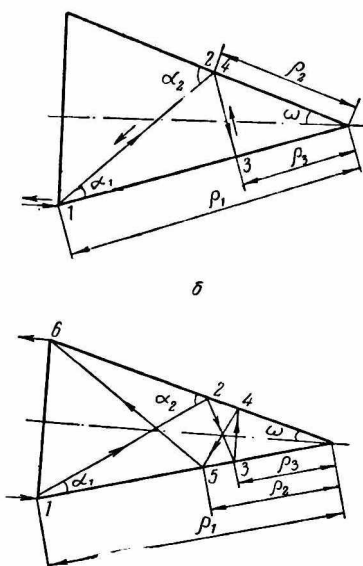


Рис. 1. Ход лучей в конической полости: а — при нечетном N ; б — при четном N ;

Для простоты анализа предположим, что угол полуоткрыва конуса ω выбран таким образом, что каждый луч при этом испытывает внутри конуса одинаковое число отражений N , т. е. $N = \frac{\pi}{2\omega}$ — целое число. В этом случае луч сначала движется к вершине конуса, а потом возвращается по тому же пути, если N нечетное, и по зеркальному относительно оси конуса, когда N четное. При этом, поскольку $\rho_i = \rho_{N-i+1}$, для получения плотности поглощенной энергии суммирование плотностей для частных поглощений ρ_i можно производить попарно для S_i

$$\rho_i = \frac{E_i + E_{N-i+1}}{S_i}, \quad (6)$$

что позволяет значительно сократить вычислительный процесс.

Для практических целей удобно пользоваться плотностью поглощенной энергии, нормированной на плотность энергии входящего в конус излучения:

$$\bar{\rho}_i = \frac{\rho_i}{\rho_0}, \quad (7)$$

где $\rho_0 = \frac{E_0}{S_0}$ — плотность энергии входного излучения.

Используя (6) и (7), получаем окончательно выражение для нормированной плотности энергии, поглощенной на участке образующей $\rho_i < \rho < \rho_{i+1}$:

$$\bar{\rho}_i = \frac{1}{\sin \omega} \sum_{i=1}^l \left[(1 - R_i) \prod_{j=1}^{i-1} R_j + (1 - R_{N-i+1}) \prod_{j=1}^{N-i} R_j \right] \sin^2 \alpha_i, \quad (8)$$

где

$$l = \begin{cases} 1, 2, \dots, \frac{N}{2} & (N \text{ четное}); \\ 1, 2, \dots, \frac{N+1}{2} & (N \text{ — нечетное}). \end{cases}$$

Зависимость $\bar{\rho}_i(\rho)$, выраженная формулой (8), получается кусочно-постоянной с разрывами непрерывности в точках ρ_i .

Расчет распределения относительной плотности поглощенной энергии в зеркальном конусе проводился для угла полуоткрыва $\omega = 1,5^\circ$. Оптические постоянные n и k получены путем аппроксимации данных, приведенных в работе [4], для меди (при длине волн излучения рубинового и неодимового ОКГ);

$$n = 0,5; k = 2,5 \quad (\lambda = 0,69 \text{ мкм});$$

$$n = 0,5; k = 5,0 \quad (\lambda = 1,06 \text{ мкм}).$$

На рис. 2 приведены результаты расчета, в которых кусочно-непрерывная зависимость усреднена в непрерывную.

Из графика следует вывод, что плотность поглощенной энергии по длине конуса распределена весьма неравномерно. Существует значительная область у основания конуса, где поглощенная плотность энергии весьма мала, причем с уменьшением угла ω поглощенная плотность энергии у вершины конуса возрастает, а область резкого возрастания поглощенной плотности энергии располагается все ближе к вершине конуса. Поглощенная плотность энергии у вершины конуса может в несколько раз превышать плотность энергии, поступающей в конус.

С увеличением поглощения материала конуса перепад поглощенных плотностей энергии между основанием и вершиной резко уменьшается.

На рис. 2 также приведена экспериментальная зависимость распределения поглощенной плотности энергии для медного конуса с диаметром основания 15 мм и высотой 250 мм, снятая на излучении собственной генерации рубинового и неодимового ОКГ. Конусная нагрузка была получена методом гальванического осаждения меди на оправку из нержавеющей стали с последующим снятием. Профиль толщины стенки конуса выдерживался таким образом, чтобы масса меди на единицу длины конуса была постоянной. Вдоль образующей конуса было размещено десять идентичных батарей термопар, горячие спаи которых располагались на конусе, а холодные — на массивном медном теле, температура которого в процессе измерений практически не изменялась. После воздействия оптического импульса максимальная электродвижущая сила каждой термобатарей пропорциональна поглощенной энергии на том участке конуса, вдоль которого она размещена. Отношение э. д. с. каждой термобатарей к боковой поверхности соответствующего участка конуса и плотности поступающей энергии дает относительное распределение поглощенной энергии вдоль конуса. Входная энергия контролировалась вспомогательным калориметром, в который отвечалась стеклянной пластинкой небольшая часть энергии генератора. Качественный характер экспериментального распределения совпадает с теоретическим.

Количественное отличие экспериментальной кривой от теоретической объясняется смешанным коэффициентом отражения внутренней поверхности конуса, в которой имеется как зеркальная, так и диффузная составляющие. Кроме того, угол раскрытия конуса ω составляет $1,7^\circ$ вместо расчетного $1,5^\circ$. Диффузная составляющая коэффициента отражения приводит к более плавному распределению поглощенной энергии вдоль конуса, что более благоприятно для оптических нагрузок, используемых в калориметрических измерителях.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Нестеренко. Измеритель энергии миллисекундных импульсов ОКГ типа ИЭК-1 и методы определения погрешности измерений. Сб. «Импульсная фотометрия», Изд-во «Машиностроение», 1969.
2. Н. Г. Кокодий, В. М. Кузьмичев, Н. И. Зинченко, Р. А. Валигов. Калориметрический измеритель импульсной энергии и мощности ОКГ средних и больших уровней. Сб. «Импульсная фотометрия». Изд-во «Машиностроение», 1969.
3. Е. Я. Говорун, В. М. Кузьмичев, В. И. Полевой. О поглощательной способности круговых конусов. «Электронная техника», серия 11, вып. 1 (10), 1969.
4. И. Н. Шкляревский, В. Г. Падалка. Измерение оптических постоянных меди, золота, никеля в инфракрасной области спектра. «Оптика и спектроскопия», VI, вып. 1, 1959.

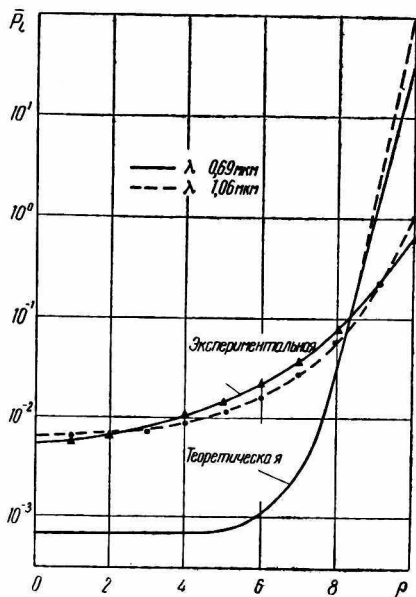


Рис. 2. Распределение поглощенной энергии вдоль образующей конуса.