

УДК 536.631

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕЩЕСТВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ЛАЗЕРНЫЙ НАГРЕВ

А. О. НАЗАРЯН, Б. М. СМЕРНОВ, Н. Т. ШАХБАЗЯН

(Поступила в редакцию 5 августа 1991 г.)

В работе представлены лазерные методы определения теплофизических и спектральных характеристик веществ. Максимальная температура нагрева составляет 2000 К. Возможности методики продемонстрированы на примере древесного угля в области температур от 300 до 700 К.

Введение. В современной технологии при исследовании и расчетах режимов работы разного рода реакторов необходимо знать значения теплофизических и спектральных характеристик веществ, используемых в реакторах в качестве топлива, а также продуктов их горения. Лазерные методы определения указанных характеристик разработаны относительно недавно [1, 2] и позволяют определить температуропроводимости, удельные теплоемкости, излучательные способности, коэффициент серости и оптические константы элементов топлива АЭС при высоких температурах. Эти константы используются при анализе тепловых потоков в реакторе и изучении возможности охлаждения активной зоны реактора после аварии. Данные по излучательной способности дополнительно позволяют измерять температуру расплавленного топлива пирометрическим методом в высокотемпературных экспериментах. Все это должно способствовать пониманию процессов, происходящих в реакторах и тем самым увеличить надежность и безопасность их эксплуатации.

В [1—4] сообщается о большом числе экспериментальных работ по определению температуропроводимости, удельной теплоемкости топлива АЭС лазерным методом. Принцип его действия заключается в следующем: небольшой образец в виде диска помещается в вакуумную камеру и нагревается до заданной температуры. Когда температура выравнивается, импульс лазера повышает температуру в некоторой точке поверхности образца. Повышение температуры в центре обратной стороны диска регистрируется термодатчиком. Определяется время, необходимое для достижения обратной стороной образца половины максимума температуры [2], далее вычисляется температуропроводимость.

Удельная теплоемкость образца определяется измерением поглощенной плотности потока энергии лазерного импульса и максимума температуры. Как указано в работе, основная трудность заключается в точном определении поглощенной энергии лазерного излучения. Для решения этой проблемы на образце закрепляется тонкий гладкий диск из углерода в целях увеличения коэффициента поглощения лазерного излучения.

В данной работе представлены экспериментальные методы определения теплофизических и спектральных характеристик веществ, использующие лазерный нагрев. Методы позволяют измерить температуропроводность, удельную теплоемкость, излучательную способность, коэффициент серости и коэффициент поглощения лазерного излучения одновременно, что существенно увеличивает точность определяемых и теоретических расчетов, где впоследствии используются эти величины. Область исследуемых температур составляет до 2000 К. Возможности методики продемонстрированы на примере древесного угля. Максимальная температура при этом не превышает 700 К. Ограничение обусловлено тем, что при больших температурах заметным становится процесс горения угля. Эксперименты проводятся в инертной газовой среде, но присутствие малых примесей кислорода в газе, а также адсорбированного в микропорах угля, делают отмеченный процесс горения существенным, что вносит дополнительную погрешность.

Экспериментальные методы и результаты. Методы основаны на анализе скоростей нагрева и остывания образца. На рис. 1 показана термограмма нагрева образца лазерным излучением. Разные участки термограммы характеризуются соответствующим видом уравнения теплового баланса [5]. Нагрев (область t_1-t_2) характеризуется следующим видом уравнения

$$c_p m \frac{dT}{dt} = \beta I - \gamma(T - T_0),$$

где c_p , m , T , β —соответственно удельная теплоемкость, масса, температура, коэффициент поглощения лазерного излучения образцом. I —интенсивность лазерного луча, γ —параметр теплоотдачи образца, t —время нагрева, T_0 —начальная температура образца.

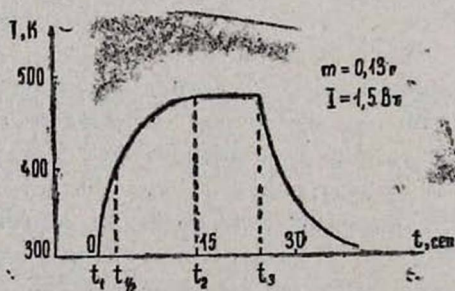


Рис. 1.—Термограмма нагрева образца лазерным излучением.

Отрезок t_2-t_3 характеризуется уравнением баланса

$$I\beta = \gamma(T_m - T_0), \quad (1)$$

где T_m —максимальная температура образца.

Отрезок времени с момента t_3 характеризуется уравнением

$$c_p m \frac{dT}{dt} = \gamma (T - T_0).$$

Величина полной теплопотери $\gamma (T - T_0)$ в случае образца сферической формы может быть записана [5]

$$\gamma (T - T_0) = 4\pi r_0^2 \alpha \sigma (T^4 - T_0^4) + \frac{\kappa(T)}{r_0} (T - T_0) 4\pi r_0^2, \quad (2)$$

где r_0 —радиус образца, α —коэффициент серости, σ —постоянная Стефана-Больцмана, $\kappa(T)$ —теплопроводность газа.

В эксперименте проводились измерения полных теплопотерь, для чего исследуемый образец в виде шарика или диска закреплялся на термопаре, помещался в термостат в виде сферы [6], который нагревался с двух сторон излучением неодимового лазера, максимальная мощность которого составляла 200 Вт. Все это помещалось в камеру с инертной газовой средой. Термостат-сфера изготовлен из молибденовой фольги толщиной 5×10^{-5} м. диаметром $1,5 \times 10^{-2}$ м. При определенной мощности лазера термограмма нагрева образца имеет соответствующую температуру насыщения T_m после достижения которой вещество нагревается дополнительно на $\Delta T \ll T_m$ третьим лучом, потом дополнительный нагрев выключался. По термограмме нагрева и остывания от дополнительного нагрева определялась величина полной теплопотери. Сравнением расчетных значений (2) с экспериментальными получаем величины c_p и α . Как отмечалось, возможности методики показаны на примере древесного угля типа БАУ. В табл. 1 приведены температурные зависимости теплоемкости разных типов углей от температуры. Результаты данной работы показаны и на рис. 2.

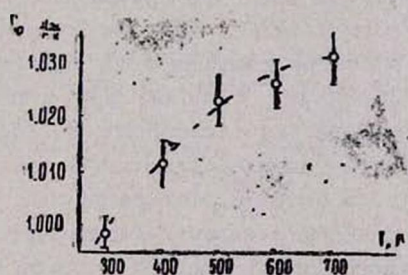


Рис. 2. Температурная зависимость теплоемкости древесного угля (БАУ).

В случае определения излучательной характеристики угля БАУ отметим, что при экспериментальных измерениях и расчетах по определению тепловых потерь за счет теплового излучения необходимо учесть, что этот канал потерь дает существенный вклад в общие теплопотери при достаточно высоких температурах. Так, для тела сферической фор-

мы отношение теплотер за счет излучения к общим представлено в табл. 2.

Таблица 1

Вид угля	Температура, К					Литература
	300	400	500	600	700	
Антрациты и тощие угли	0,924	0,966	1,050	1,134	1,176	[7]
Каменный уголь	0,966	1,092	1,260	1,428	—	— " —
Бурый уголь	1,092	1,260	1,470	—	—	— " —
Древесный уголь БАУ	0,997	1,011	1,022	1,023	1,031	Данная работа

Таблица 2

T°K	Теплопотери излучением, Вт	Теплопотери теплопровод. газа, Вт	Полные теплопотери, Вт	Отношение потерь излуч. на полные, %	Давление газа N ₂ , кПа	Радиус образца, 10 ⁻²
400	0,01	0,04	0,05	21	6,7	0,1
500	0,03	0,08	0,11	27		
600	0,07	0,11	0,18	39		
700	0,13	0,15	0,28	46		

Как видно из таблицы, при 400 К это отношение составляет 0,2, а при 700 К—почти половина всех теплотер обусловлена тепловым излучением. Отметим, что в указанной области давлений газа и размеров образца, а также при этих температурах конвекция отсутствует и полные теплопотери складываются за счет теплопроводности газа и теплового излучения. Из сказанного следует, что для практических применений представляют интерес значения коэффициента серости при относительно высоких температурах. С другой стороны, при невысоких температурах большая погрешность определения теплотер за счет излучения приводит к большой погрешности определения самого коэффициента серости. С учетом вышесказанного отметим, что указанный коэффициент в настоящей работе был определен в области температур от 500 до 700 К и равен $\alpha = 0,83 \pm 0,11$ (погрешность отражает статистическое усреднение значений для разных температур).

В работе определялся коэффициент поглощения лазерного излучения. Этот параметр позволяет определить долю энергии лазера, которая идет на нагрев образца. Очевидно, что эта характеристика зависит от формы образца. Являясь максимальной при нормальном падении излучения на поверхность, эта величина убывает, скажем, в случае сферической формы образца, по закону $\cos i$, где i —угол падения излучения лазера на поверхность. В экспериментах использовались образцы как сфе-

рической формы, так и в виде таблетки. Воспользовавшись уравнением (1) при знании температур насыщения, мощности лазерного луча и теплотопотерь, получим для

$$\beta = \frac{\gamma(T_m - T_0)}{I}$$

соответствующие значения. На рис. 3 представлена температурная зависимость коэффициента поглощения лазерного излучения. Отметим, что погрешность определенная в случае сферической формы образца порядка 46%, в случае таблетки—10%. Это объясняется наличием модового состава лазерного излучения и ее определенной пространственной нестабильностью. Погрешность, указанная на рис. 3, является следствием статистического усреднения разных значений.

И, наконец, в эксперименте определялся коэффициент температуропроводности. Как известно, он связан с коэффициентом теплопроводности соотношением $\alpha = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ см²/с, где λ —теплопроводность, c_p —теплоемкость, ρ —удельный вес исследуемого вещества.

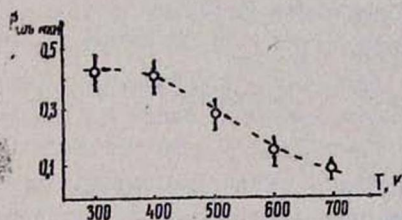


Рис. 3.

Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента поглощения лазерного излучения древесным углем (БАУ).

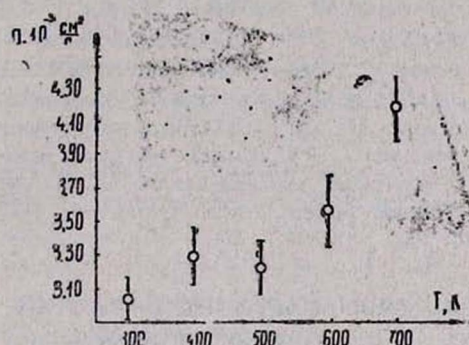


Рис. 4.

Рис. 4. Температурная зависимость температуропроводности древесного угля (БАУ).

Температуропроводность определялась следующим образом: как и в [2] образец в виде диска помещался в вакуумную камеру и нагревался в термостате с лазерным нагревом до заданной температуры. Образец в термостате закреплялся на термопаре. После установления и выравнивания температуры образец нагревался лучом дополнительного нагрева до определенного уровня температур (см. рис. 1). После определения времени коэффициент температуропроводности определялся по формуле [2]:

$$\alpha = \frac{1,37x^2}{\pi^2 t_{1/2}}, \text{ где } x \text{ — толщина образца.}$$

Проводились измерения для разных толщин образца и для разных мощностей лазерного луча. Результаты представлены на рис. 4. Указанная погрешность является следствием статистического усреднения результатов измерения.

Заключение. В работе представлены методы определения теплофизических и спектральных характеристик веществ на примере древесного угля. Получены значения температуропроводности, теплоемкости, излучательной способности и коэффициента поглощения лазерного излучения в области температур от 300 до 700 К. Методика использует лазерный нагрев и может быть использована для разных веществ, максимальная температура нагрева 2000 К. Основные преимущества методики: экспериментальное определение параметра теплоотдачи исследуемого образца, одновременность определения перечисленных характеристик веществ в одном эксперименте, что повышает точность получаемых значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Takahashi Y., Murabayashi M., J. Nucl. Sci. Technol., 12, 133 (1975).
2. Промышленное применение лазеров. Под ред. Г. Кебнера. М., 1988, с. 178.
3. Weilbacher J. C., High Temperatures—High Pressures, 4, 431 (1972).
4. Schulz B., Private Communication. Institute of Materials and Solid State Research, Nuclear Research Centre, Karlsruhe, FRG, 1981.
5. Назарян А. О. Кандидатская диссертация, Новосибирск, 1985, 126 с.
6. Григорьев Г. Ю., Назарян А. О., Пляхин В. Г., Смирнов Б. М. Устройство для измерения тепловыделения. А. С. № 1241117, 26.12.84 г.
7. Тепловой расчет котельных агрегатов. Под ред. Н. В. Кузнецова. М., 1973, 296 с.

ԱՋԵՐԱՑԻՆ ՏԱՔԱՑՄԱՆ ԿԻՐԱՌՄԱՍԲ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԶԵՐՄԱՑԻԶԻԿԱԿԱՆ ԵՎ ՍՊԵԿՏՐԱԼ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐ Ա. Ն. ՆԱԶԱՐՅԱՆ, Բ. Մ. ՍՄԻՐՆՈՎ, Ն. Թ. ՇԱՀԲԱԶՅԱՆ

Աշխատանքում ներկայացված են նյութերի ջերմաֆիզիկական և սպեկտրալ բնութագրերի որոշման լազերային մեթոդներ: Տարացման մաքսիմալ ջերմաստիճանը 2000 К: Սպեկտրիկայի հնարավորությունները ցույց են տրված փայտածխի օրինակի վրա 300-ից մինչև 700 К ջերմաստիճանային տիրույթում:

METHODS FOR DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL AND SPECTRAL PROPERTIES OF MATERIALS USING LASER HEATING

A. N. NAZARIAN, B. M. SMIRNOV, N. T. SHAHBAZIAN

Methods for determination the thermophysical and spectral properties of materials are given. The maximum temperature of heat is 2000 K. The possibilities of the method is demonstrated using the example of charcoal in temperature region from 300 K to 700 K.