

## О СВЯЗИ ТЕПЛОТЫ ГАЗИФИКАЦИИ ГОРЮЧИХ СО СКОРОСТЬЮ ГОРЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СМЕСЕЙ

В. И. Брагинский, Н. Н. Бахман  
(Москва)

Суммарная теплота газификации ( $Q_{\text{газ}}$ ) различных горючих (т. е. количество тепла, затраченное на их прогрев и испарение или разложение с образованием газообразных продуктов) представляет значительный интерес при расчете процессов абляции различных пластиков, при газификации шашки горючего в потоке окислителя, а также для процессов горения конденсированных смесей.

В данной работе определены значения  $Q_{\text{газ}}$  для ряда органических горючих двумя методами. В первом методе [1] горючее газифицируется на поверхности блок-калориметра, нагретого до температуры 350—700°С. Этот метод является прямым и обладает достаточной точностью, однако он трудоемок. Трудности возникают при определении  $Q_{\text{газ}}$  для термостойких горючих. Поскольку для корректной постановки опыта необходимо, чтобы продолжительность пиролиза была мала по сравнению с периодом тепловой релаксации блока, то температура на торцовой поверхности блока должна быть достаточно велика, чтобы пиролиз проходил с высокой скоростью. Так, для определения  $Q_{\text{газ}}$  полистирола температура блока должна быть не ниже 700°С.

В данной работе был разработан простой метод оценки теплоты газификации по степени снижения скорости горения термитного состава при добавлении в него исследуемого вещества. Метод является относительным, так как для определения  $Q_{\text{газ}}$  исследуемого вещества используются результаты, полученные для эталонного вещества.

Снижение скорости горения взрывчатых веществ при введении в них добавок инертных веществ изучено в ряде работ [2—4]. В работе [5] обнаружено, что для некоторых добавок существует связь между степенью уменьшения скорости горения и расчетными значениями  $Q_{\text{газ}}$  вводимых добавок<sup>1</sup>. Но в данной системе скорость горения может снижаться и за счет разбавления реагирующей смеси продуктами разложения добавки.

В термитной системе маловероятно, чтобы продукты разложения органики участвовали в реакции горения. Во-первых, известно [6], что при горении термитного состава основная реакция идет в конденсированной фазе; во-вторых, металл (например, алюминий или магний) является активным горючим и будет окисляться в первую очередь. Поэтому можно предположить, что малые количества горючих, введенные в термитный состав, будут вести себя как инертная добавка.

Примем, что добавка лишь снижает температуру горения термита, не изменяя энергию активации  $E$  и теплоемкость системы. Используя теорию Зельдовича [7], можно выписать следующие соотношения. Пусть

$$u = A e^{-\frac{E}{2RT_{\Gamma}}} \text{— скорость горения термита с добавкой исследуемого горючего, а } u_0 = A e^{-\frac{E}{2RT_{\Gamma_0}}} \text{— скорость горения термита без добавки; } T_{\Gamma} \text{— температура горения термита с добавкой; } T_{\Gamma_0} \text{— температура горения термита без добавки; } \chi \text{— весовая доля добавки исследуемого горючего; } Q_0 \text{— теплота горения термита без добавки; } Q_{\text{газ}} \text{— суммарная теп-}$$

<sup>1</sup> Такое соответствие наблюдалось далеко не для всех добавок.

лота, затрачиваемая на прогрев исследуемого вещества, его газификацию и прогрев продуктов газификации до  $T_r$ . Уравнение баланса тепла запишется в виде:

$$(1 - \chi) Q_0 = (1 - \chi) c (T_r - T_0) + \chi Q_{\text{газ}}, \quad (1)$$

где  $c$  — теплоемкость термита. Определяя  $T_r$  из выражения (1) и подставляя его в выражение  $\ln u - \ln u_0$ , получим:

$$\ln \frac{u}{u_0} = - \frac{E}{2R} \frac{T_{r_0} - T_r}{T_{r_0} \cdot T_r}. \quad (2)$$

Обозначим  $\frac{u}{u_0} = z$  и примем, как это обычно делается,  $T_{r_0} \cdot T_r \approx T_{r_0}^2$ , тогда (2) запишется в виде

$$\ln z = - \frac{E}{2R} \frac{T_{r_0} - T_r}{T_{r_0}^2}. \quad (3)$$

Написав аналогичные выражения для эталонного вещества (все величины, относящиеся к эталонному веществу, обозначены индексом «эт») и подставив выражение для  $T_{r_0} - T_r$ , получим:

$$\frac{\ln z}{\ln z_{\text{эт}}} = \frac{\frac{\chi}{1 - \chi} Q_{\text{газ}}}{\frac{\chi_{\text{эт}}}{1 - \chi_{\text{эт}}} (Q_{\text{газ}})_{\text{эт}}}. \quad (4)$$

или при  $\chi = \chi_{\text{эт}}$

$$Q_{\text{газ}} = (Q_{\text{газ}})_{\text{эт}} \frac{\ln z}{\ln z_{\text{эт}}}. \quad (5)$$

Во всех опытах за эталонное вещество брался полиметилметакрилат (ПММА),  $Q_{\text{газ}}$  которого, согласно [1], равно 380 кал/г. Следует указать, что значение  $Q_{\text{газ}}$  взято для эталонного вещества из условий пиролиза на блок-калориметре. Это является не вполне корректным, так как условия газификации горючего на блок-калориметре и в термите различны. В частности, газообразные продукты пиролиза горючего в термите в пределах зоны влияния будут нагреваться до более высокой температуры, чем в условиях блок-калориметра.

Основные эксперименты были проведены на термите состава 40% Al и 60% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Применялся алюминий марки ПП-4 и окись железа марки ч. д. а. Состав готовился путем тщательного смешения компонентов на кальке резиновой пробкой. Добавки органических горючих вводились в количестве 5—10 вес.% сверх 100%. Приготовленная таким образом смесь запрессовывалась в латунные стаканчики диаметром 10 мм. Удельное давление прессования составляло  $p = 1500$  кг/см<sup>2</sup>. Образцы сжигались в бомбе постоянного давления в атмосфере азота при давлении 1 ата. Скорость горения измерялась с помощью чувствительного пьезодатчика давления и шлейфного осциллографа.

В предварительных опытах было исследовано влияние состава термита на величину  $Q_{\text{газ}}$ . Наиболее удобным для работы оказался термит 40% Al + 60% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, так как горение такого состава незатухает при содержании добавки С = 11% (в то время как горение 50% Al + 50% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> затухает при С ≥ 8%, а 30% Al + 70% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — при С ≥ 9%). Однако важно подчеркнуть, что при самых малых процентах добавки  $Q_{\text{газ}}$  слабо зависит от соотношения между алюминием и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (табл. 1). Более того, очень близкие значения  $Q_{\text{газ}}$  получены в опытах с термитом 30% Mg + 70% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Все это свидетельствует об отсутствии случайности в значениях  $Q_{\text{газ}}$ .

Таблица 1

Горючее	$Q_{\text{газ}}, \text{ кал/г}$			
	30 % Al+ +70 % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40 % Al+ +60 % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50 % Al+ +50 % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30 % Mg+ +70 % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Полистирол . . . . .	415	420	405	—
Дифенил . . . . .	—	240	—	245
Бензил . . . . .	—	260	—	280
Дифениламин . . . . .	—	205	—	220

Далее, для термита 40% Al + 60% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> было установлено, что  $Q_{\text{газ}}$  слабо зависит от процента добавки исследуемого горючего в термите (табл. 2). Как видно из таблицы, для большинства горючих характерен рост величины  $Q_{\text{газ}}$  с увеличением процента добавки.

Значения  $Q_{\text{газ}}$  для некоторых горючих были определены двумя методами. Несмотря на то, что метод термита является весьма при-

Таблица 2

Горючее	Влияние содержания С, % на $Q_{\text{газ}}, \text{ кал/г}$				
	7	8	9	10	11
Полиэтилен . . . . .	420	490	500	—	—
Полистирол . . . . .	420	430	405	—	—
Карбазол . . . . .	370	390	300	340	—
<i>n</i> -Фенилендиамин . . . . .	290	390	300	—	—
Голан . . . . .	—	290	290	300	300
Бензил . . . . .	—	214	235	260	265
Азобензол . . . . .	—	—	220	240	250
Дифенил . . . . .	—	230	230	240	240
Стильбен . . . . .	—	220	205	240	240
Дифениламин . . . . .	—	190	205	205	205

ближенным, величины  $Q_{\text{газ}}$ , определенные различными методами, достаточно близки между собой (табл. 3).

Из таблицы следует, что значения  $Q_{\text{газ}}$  зависят от природы горючего. Особенно велико  $Q_{\text{газ}}$  для полимеров (от 400 до 500 кал/г); наи-

Таблица 3

Горючее	$Q_{\text{газ}}, \text{ кал/г}$ , определен. методом		$u_{\text{тах}}, \text{ мм/сек}$ при $p=100 \text{ ат}$
	термита	блок-калориметра	
Полвинил карбазол ( $n \approx 10$ ) . . . . .	510	—	30,0
Полиэтилен . . . . .	500	565	14,0
Полвинил карбазол ( $n \approx 5$ ) . . . . .	430	—	20,1
Полистирол . . . . .	430	450	26,5
Себаценовая кислота . . . . .	410	395	12,0
Карбазол . . . . .	360	—	18,3
Азелаиновая кислота . . . . .	360	350	14,0
<i>n</i> -Фенилендиамин . . . . .	300	310	28,0
Толан . . . . .	290	230	14,5
Бензил . . . . .	260	240	13,3
Азобензол . . . . .	250	240	15,4
Дифенил . . . . .	240	230	10,5
Дифениламин . . . . .	205	235	12,3

меньшей теплотой газификации обладают производные дифенила (200—300 кал/г).

Из теоретических соображений следует, что в рамках неоднородной задачи теплота газификации должна влиять на форму поверхности горящего заряда и скорость горения. Однако ясно, что теплота газификации горючего не является независимым параметром. Величина  $Q_{\text{газ}}$  связана с такими параметрами, как химическая структура горючего, теплота его сгорания и т. д., которые сами по себе существенно влияют на скорость горения. Поэтому отсутствие корреляции между  $Q_{\text{газ}}$  и скоростью горения смесевой системы (см. табл. 3) указывает на то, что  $Q_{\text{газ}}$  горючего не является основным параметром, определяющим скорость горения смесевой системы.

Поступила в редакцию  
30/VI 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Дмитриев, О. А. Кочетов и др. ФГВ, 1969, 5, 1.
2. К. К. Андреев. Сб. «Теория ВВ». М., Оборонгиз, 1963.
3. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение ВВ. М., «Наука», 1966.
4. P. Gray, I. C. Lee, D. C. Taylor. 6-th Symposium (International) on Combustion, 1957.
5. В. Э. Анников, Б. Н. Кондриков, Н. А. Полякова. ФГВ, 1969, 5, 1.
6. А. Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных ВВ. М., «Наука», 1968.
7. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 11—12.

УДК 538.4+536.46

### О ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ФРОНТА МЕДЛЕННОГО ГОРЕНИЯ В МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ ПРИ БОЛЬШИХ $Re_m$

А. С. Плешанов  
(Москва)

Гидродинамическая неустойчивость фронта медленного горения по отношению к малым периодическим возмущениям его формы была теоретически установлена в классической гидродинамике Даррье [1] и Ландау [2]. В данной работе дается обобщение результатов этих работ на случай идеально проводящей несжимаемой жидкости в магнитном поле.

Систему уравнений магнитной гидродинамики удобно записать здесь в симметричной форме [3]

$$\begin{aligned} [\partial / \partial t + (\vec{w}_\pm \nabla)] \vec{w}_\pm + \nabla \varphi = 0, \quad \text{div } \vec{w}_\pm = 0, \\ \vec{w}_\pm = \vec{v} \pm \vec{u}, \quad \varphi = p/\rho + \vec{u}^2/2, \quad \vec{u} = \vec{H} / \sqrt{4\pi\rho}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\vec{v}$  — скорость;  $\vec{H}$  — напряженность магнитного поля;  $p$  — давление;  $\rho$  — плотность. На поверхности разрыва должны соблюдаться условия непрерывности [4] потока массы

$$\{j\} \equiv \{\rho v_\perp\} = 0,$$