

ЛИТЕРАТУРА

1. Хмельницкий Л. И., Новиков С. С., Годовикова Т. И. Химия фуроксапов (строение и синтез).— М.: Наука, 1981.
2. Аткинсон Р. С. Общая органическая химия/Под ред. Д. Бартона, У. Д. Оллиса.— М.: Химия, 1982.— Т. 3.
3. Фогельзанг А. Е., Егоршев В. Ю., Пименов А. Ю. и др. Докл. АН СССР, 1985, 282, 6, 1449.
4. Смагин Н. П., Кондриков Б. Н. // Взрывное дело.— М.: Недра, 1982.— № 84/41.
5. Кондриков Б. Н., Свиридов Е. М. ФГВ, 1971, 7, 2, 204.
6. Кондриков Б. Н., Райкова В. М., Самсонов Б. С. ФГВ, 1973, 9, 1, 84.
7. Беляев А. Ф., Беляева А. Е. Докл. АН СССР, 1947, 56, 491.
8. Зельдович Я. Б. ЖЭТФ, 1942, 12, 11/12, 498.
9. Беляев А. Ф. ЖФХ, 1938, 12, 1, 93.
10. Марголин А. Д., Фогельзанг А. Е. ФГВ, 1966, 2, 2, 10.
11. Якушева О. Б., Максимов Э. И., Мержанов А. Г. ФГВ, 1966, 2, 3, 125.
12. Dyall L. K., Kemp J. E. J. Chem. Soc., 1968, B, 9, 976.
13. Patai S., Gotshal Y. J. Chem. Soc., 1966, B, 6, 489.
14. Корсунский Б. Л., Апина Т. А. Изв. АН СССР. Сер. хим., 1971, 9, 2080.

г. Москва

Поступила в редакцию 21/VI 1989

УДК 614.841.12

*С. Г. Цариченко, Ю. Н. Шебеко, А. Я. Корольченко,
О. Я. Еременко, В. Д. Келлер*

ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛИЗАТОРОВ НА ГОРЕНИЕ БЕДНЫХ ВОДОРОДОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ЗАМКНУТОМ СОСУДЕ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА

Внимание многих исследователей привлекают вопросы взаимодействия распространяющегося по газовой смеси пламени с турбулизирующими препятствиями. Помимо теоретического интереса изучение данной проблемы имеет большое прикладное значение в связи с задачей обеспечения пожаро- и взрывобезопасности технологического оборудования и производственных помещений. В ряде работ обнаружено существенное ускорение пламени при взаимодействии с турбулизирующими препятствиями [1—6]. При этом опыты выполнялись либо в открытом пространстве [1, 2], либо в полуограниченных объемах [3—6], когда возможно истечение свежей смеси и продуктов сгорания за счет их расширения. В то же время влияние турбулизаторов на распространение пламени в замкнутых сосудах изучено недостаточно. Здесь следует отметить работу [7] по исследованию влияния решеток на сгорание водородовоздушных смесей различного состава, результаты которой, по мнению самих ее авторов, носят предварительный характер.

Цель настоящей работы — исследование влияния турбулизаторов различных типов на сгорание бедных водородовоздушных смесей в замкнутом сосуде большого объема.

Экспериментальный стенд создан на основе цилиндрического реакционного сосуда объемом 20 м³ (диаметр $d = 2,2$ м, высота 5,5 м), рассчитанного на давление до 1,0 МПа, и включал в себя, помимо сосуда системы вакуумирования, подачи компонентов смеси и перемешивания, зажигания и регистрации давления. Перед опытом реакционный сосуд вакуумировали, затем подавали в него требуемые количества водорода и воздуха и перемешивали смесь вентиляторами. В предварительных опытах показано, что однородность смеси достаточно высока (максимальная разница в концентрациях водорода c_{H_2} не превышает 0,3 % (по объему), в том числе и в области расположения турбулизаторов). Турбулизаторы испытывали в двух сериях опытов.

© 1990 Цариченко С. Г., Шебеко Ю. Н., Корольченко А. Я., Еременко О. Я., Келлер В. Д.

В первой серии экспериментов применяли турбулизаторы двух типов и их комбинацию. Турбулизатор I — горизонтальный цилиндр из проволочной сетки с размером ячейки $3 \times 5 \text{ мм}^2$ и наглухо закрытыми торцевыми поверхностями. Длина образующей цилиндра $l = 200 \text{ мм}$, диаметр основания $d_0 = 150 \text{ мм}$. Турбулизатор II — это горизонтальный цилиндр из проволочной сетки с размером ячейки $2 \times 2 \text{ мм}^2$, $l = 480$ и $d_0 = 340 \text{ мм}$. Комбинация турбулизаторов заключалась в размещении цилиндра I внутри цилиндра II. Оси цилиндрических образующих расположены горизонтально на высоте 1,8 м от нижнего дна сосуда. Смесь зажигали электрической искрой с энергией 30–40 Дж в центре турбулизирующих цилиндров (в случае их комбинации — в центре внутреннего). В первой серии экспериментов в некоторых опытах исследовали частично перемешанные водородовоздушные смеси, получаемые подачей заданного количества H_2 в заполненный воздухом реакционный сосуд. Водород подвели в центр турбулизирующих цилиндров вблизи места зажигания через патрубок с $d = 10 \text{ мм}$ с расходом около $2 \text{ дм}^3/\text{с}$, зажигали через 60 с после напуска газа.

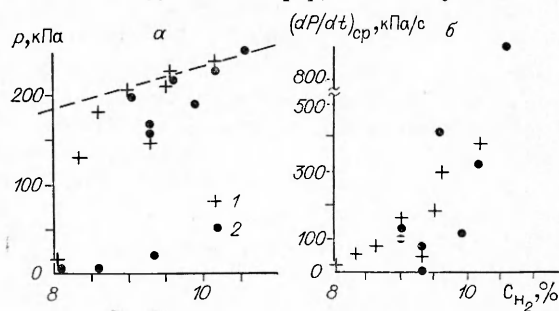
Турбулизатор III, использованный во второй серии экспериментов, представлял собой совокупность пяти концентрических цилиндров с $l = 1 \text{ м}$ из проволочной сетки, изготовленной из навитой в спираль проволоки толщиной 1,5 мм, d спирали 12, шаг спирали 21 мм. Внутренний цилиндр имел $d = 100 \text{ мм}$, а у последующих диаметры образовывали арифметическую прогрессию с шагом 100 мм (у внешнего цилиндра $d = 500 \text{ мм}$). Цилиндры расположены горизонтально на высоте $\sim 1,8 \text{ м}$ от нижнего дна сосуда, основания цилиндров свободны (не затянуты сеткой). Источник зажигания располагали в центре внутреннего цилиндра.

Влияние турбулизаторов оценивали по изменению давления взрыва p и средней скорости его нарастания $(dp/dt)_{\text{ср}}$, которые определяли по осциллограммам давление — время, регистрируемым измерительным комплексом «Сапфир-22» и светолучевым осциллографом Н-115. Точность измерения указанных величин не ниже 10 %, временная разрешающая способность не хуже 10^{-2} с .

Результаты первой серии экспериментов представлены в таблице. Видно, что наличие турбулизаторов относительно слабо влияет на избыточное давление взрыва водородовоздушных смесей. Более сложна зависимость $(dp/dt)_{\text{ср}}$ от турбулизаторов и их вида при различных c_{H_2} . Для локальных и предварительно перемешанных смесей при малых количествах H_2 наличие турбулизаторов приводит к заметному увеличению $(dp/dt)_{\text{ср}}$. С ростом c_{H_2} характер влияния турбулизаторов меняется, а значения $(dp/dt)_{\text{ср}}$ с турбулизаторами оказываются в ряде случаев ниже, чем без них.

Результаты второй серии экспериментов представлены на рисунке (1 — наличие турбулизатора III, 2 — его отсутствие). Видно, что турбулизатор III приводит к существенному росту избыточного давления взрыва Δp в области c_{H_2} до 9 %.

При $c_{\text{H}_2} < 9 \%$ $\Delta p = 0$ в пределах ошибки эксперимента при отсутствии турбулизаторов в соответствии с данными [8], что обусловлено весьма малой степенью выгорания H_2 в нетурбулизованных водородовоздушных смесях. Наличие турбулизатора III приводит к существенному росту Δp в диапазоне c_{H_2} от 8 до 9 %. При $c_{\text{H}_2} > 9,5 \%$ Δp с турбулизатором III и без него близко к величине, даваемой термодинамическим расчетом.



Влияние турбулизаторов I, II и их комбинации на горение водородовоздушных смесей

Вид водородовоздушной смеси	c_{H_2} , %	Наличие и вид турбулизатора	Δp , кПа	$(dp/dt)_{ср}$, МПа/с
Равномерное распределение концентрации водорода	10,0	—	240	0,13
		I	260	0,17
		II	260	0,15
	12,0	I+II	260	0,18
		—	320	0,35
		I	290	0,62
	16,0	II	290	0,54
		—	410	1,10
		I	400	0,95
Локальная с частичным перемешиванием при напуске водорода *	4,0	—	110	0,16
		I	100	0,22
		II	105	0,23
	5,3	I+II	100	0,38
		—	120	0,94
		I	120	1,20
	8,8	II	120	1,10
		I+II	130	1,10
		—	220	3,80
		I	200	4,00
		II	220	2,70
		I+II	220	2,50
	10,0	—	200	2,70
		I	230	2,90
		II	230	2,90
		I+II	220	2,30

* Указана средняя по объему сосуда концентрация H_2 .

$(dp/dt)_{ср}$ в области $c_{H_2} > 9\%$ с турбулизатором III, как правило, имеет более высокое значение, хотя часто относительное различие невелико, особенно при $c_{H_2} > 9,5\%$.

Результаты настоящих экспериментов находятся в качественном согласии с данными [7], где также изучено влияние турбулизаторов в виде перфорированных перегородок на горение водородовоздушных смесей. В этой работе, как и в наших опытах, обнаружено увеличение полноты выгорания водорода в смесях с $c_{H_2} < 9\%$, в то время как при более высоких концентрациях H_2 максимальное давление взрыва при наличии турбулизатора изменяется незначительно. В [7] отмечено также, что при $c_{H_2} \leq 20\%$ турбулизатор лишь незначительно увеличивает скорость нарастания давления взрыва. Это также согласуется с нашими экспериментами.

Полученные результаты могут быть качественно объяснены следующим образом. Наличие препятствий на пути распространения пламени вызывает турбулизацию его фронта, что, в соответствии с имеющимися представлениями [8], должно приводить к росту полноты выгорания бедных водородовоздушных смесей с $c_{H_2} < 9\%$. В то же время степень этой турбулизации, вероятно, невелика по сравнению со случаем свободного пространства или наличия негерметичности на пути распространения пламени, когда скорость движения продуктов сгорания и выталкиваемой ими свежей смеси существенно выше, чем в герметичном сосуде. Это и приводит к относительно слабой зависимости $(dp/dt)_{ср}$ от наличия турбулизатора при $c_{H_2} > 9,5\%$. В некоторых случаях, вероятно, из-за теплопотерь в металлическую сетку с малыми ячейками, из которой сделаны турбулизаторы I и II, величины $(dp/dt)_{ср}$ и Δp оказываются даже более низкими.

Таким образом, в настоящей работе приведено экспериментальное исследование влияния турбулизирующих препятствий на горение бедных водородовоздушных смесей в замкнутом сосуде большого объема. Найдено, что при $c_{H_2} < 9\%$ происходит заметное увеличение полноты выгорания, при $c_{H_2} > 9,5\%$ давление взрыва как с турбулизатором, так и без него близко к термодинамической величине, а $(dp/dt)_{ср}$ с турбулизатором может быть в некоторых случаях даже ниже, чем без него. Представлена качественная интерпретация полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dörge K. J., Pangritz D., Wagner H. G. Acta Astronautica, 1976, 3, 11—12.
2. Горев В. А., Федотов В. И. ФГВ, 1986, 22, 6.
3. Moen I. O., Donato M., Knustautas B. et al. Comb. Flame, 1980, 39, 1.
4. Hjertager B. H. J. Hazardous Materials, 1984, 9, 3.
5. Taylor P. H. Comb. Sci. Techn., 1985, 44, 3/4.
6. Абдурагимов И. М., Агафонов В. В., Баратов А. П. и др. ФГВ, 1983, 19, 4.
7. Kumar R. K., Tamm H., Harrison W. C. Comb. Sci. Techn., 1983, 35, 114.
8. Furno A. L., Cook E. B., Kuchta J. M. et al. 13th Symp. (Intern.) on Comb.—Pittsburg: The Comb. Inst, 1971.

г. Балашиха

Поступила в редакцию 5/IV 1989

УДК 536.46

Е. А. Некрасов, А. М. Тимохин, А. Т. Пак

К ТЕОРИИ БЕЗГАЗОВОГО ГОРЕНИЯ С ФАЗОВЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ

Существующая теория безгазового горения с фазовыми превращениями [1, 2] построена на представлении теплоемкости вещества, претерпевающего переход, δ -функцией Дирака. Качественно соответствуя имеющимся экспериментальным данным, эта теория, однако, не дает полного представления о механизме горения. В действительности фазовое превращение определяется собственной кинетикой процесса с аррениусовским характером зависимости скорости от температуры и теплопроводностью в фазе, претерпевающей переход. Настоящая работа посвящена анализу закономерностей горения безгазовых смесей типа горючее + инерт с учетом кинетического и теплопроводностного режимов плавления инертной добавки.

Постановка задачи. Исходная смесь моделируется чередующимися слоями горючего и инерта с идеальным контактом между ними. Для определения скорости плавления инертного компонента рассмотрим отдельный слой размером r_0 , полагая его малым по сравнению с характерной тепловой толщиной фронта реакции. Неоднородностью теплового поля в инерте можно пренебречь и рассматривать задачу о его плавлении в направлении, перпендикулярном распространению волны горения. В соответствии с кинетической теорией фазовых превращений [3, 4] математическую формулировку задачи представим следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}
 c_p \rho \frac{\partial T_i}{\partial t} &= \lambda \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2}, \quad y_1(t) \leq y \leq r_0, \quad y_1(0) = r_0, \\
 y = r_0: \quad \lambda \frac{\partial T_i}{\partial y} &= \alpha (T - T_i), \\
 y = y_1(t): \quad \rho L \frac{dy_1}{dt} &= -\lambda \frac{\partial T_i}{\partial y}, \\
 \frac{dy_1}{dt} &= -K_{пл}(T_\Phi) \frac{L}{RT_{пл}T_\Phi} (T_\Phi - T_{пл}).
 \end{aligned} \tag{1}$$