

ЛИТЕРАТУРА

1. I. Hartmann, H. Greenwald. Mining and Metallurgy, 1945, 26, 463.
2. I. Hartmann. Ind. Eng. Chem., 1948, 40, 4.
3. G. Long. Ind. Eng. Chem., 1961, 53, 139.
4. Vakadsono Esikadsu. Powder Technology (Japan), 1969, 69, 7, 80.
5. В. В. Недин и др. Взрывоопасность металлических порошков. Киев, «Наукова думка», 1971.
6. Б. М. Злобинский, В. Г. Иоффе, В. Б. Злобинский. Воспламеняемость и токсичность металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1972.
7. Ю. А. Юрманов, А. Б. Рыжик и др. Четвертый Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Аннотации докл., Черногловка, ИХФ АН СССР, 1974.
8. П. Ф. Похил и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М., «Наука», 1972.
9. Э. Н. Руманов, Б. И. Хайкин. ФГВ, 1969, 5, 1, 129.
10. П. А. Маколкин. ЖПХ, 1951, 24, 5, 460.
11. В. И. Лисицын, Э. Н. Руманов, Б. И. Хайкин. ФГВ, 1971, 7, 3, 3.

О РЕГУЛЯРНОЙ И НЕРЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЕ ФРОНТА ВОЛНЫ В ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

Ю. С. Матвеев, Я. К. Трошин, Ю. В. Шуленин

(Москва)

Известно, что фронт детонации любой газовой взрывчатой смеси вдали от предела неоднороден и представляет собой трехмерную ячеистую структуру, образованную поперечными волнами [1, 2]. Причина этого — неустойчивость фронта самовоспламенения по отношению к возмущениям температуры газа за передним ударным фронтом волны детонации в ее одномерной модели [3]. Вблизи предела распространения детонации, взятого, например, по составу смеси, пульсирующая детонация вырождается в спиновую — последний возможный способ ее распространения, когда смесь воспламеняется в ядре спина, движущемся по спиральной траектории в детонационной трубе.

В [4] обращено внимание на то, что у некоторых детонирующих смесей, например у стехиометрической смеси метана с кислородом, в ячеистой структуре фронта детонационной волны отдельные крупные ячейки заполнены на порядок более мелкими неоднородностями. Аналогичные явления тонкой структуры наблюдались и в спиновой детонации [1, 5, 6]. В [7] введено понятие регулярности структуры поперечных волн, как подобие ячеек друг другу, и указано на зависимость их регулярности от химического состава смеси.

Назовем нерегулярной такую структуру фронта детонационной волны, когда внутри крупных ячеек появляются более мелкие ячейки (неоднородности). Примером регулярной ячеистой структуры фронта детонации в стехиометрической смеси водорода с кислородом могут служить фотографии, приведенные на рис. 29 и 41 в [1]. В работе [4] на рис. 21 показана фотография с торцевого отпечатка фронта детонации метаноокислородной стехиометрической смеси с нерегулярной ячеистой структурой.

По среднему размеру газодинамической неоднородности, т. е. по среднему размеру ячейки, во фронте детонационной волны, оценивается очень важный реакционно-кинетический параметр — протяженность зоны химической реакции в реальной пульсирующей детонационной волне [1, 2, 8]. Как в этом случае быть с мелкомасштабными неоднородностями — ячейками, которые могут быть как сравнимы с размером крупной ячейки, так и на порядок меньше ее? Разумеется, все это вы-

зывает определенный интерес к природе нерегулярной структуры детонационных волн в газах.

Цель данной работы — попытаться классифицировать газовые смеси с нерегулярной структурой во фронте детонационной волны и без нее.

Опыты проводились в трубах диаметром $d=30$ и 80 мм и длиной 2 м. Начальное давление взрывчатой смеси было в большинстве опытов атмосферным. С одного конца трубы детонация инициировалась электродетонаторами, а в некоторых опытах — навесками азида свинца. На другой конец помещалась торцевая равномерно закопченная металлическая пластина, при столкновении с которой фронт детонации оставлял отпечаток. Надо отметить, что используемый здесь следовый метод [9], пожалуй, единственный, позволяющий обнаружить нерегулярную структуру в ячейках фронта детонации. В некоторых опытах в середину трубы вкладывалась закопченная полоска фольги размером 500×20 мм для того, чтобы по боковым следовым отпечаткам судить об установлении стационарной детонации. Газовые смеси составлялись как в резиновом баллоне, так и в самой трубе. Практически разницы в опытах не обнаружено. Использовались кислородные смеси метана, этана, бутана, этилового спирта, диэтилового эфира, бензола, окиси углерода, ацетилена, водорода. В отдельных опытах добавлялся азот, двуокись углерода, аргон, гелий.

Оказалось, что только у смесей $2\text{CO} + \text{O}_2$, $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ и $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2$ можно получить ячейки детонационного фронта без мелкомасштабных возмущений. Регулярность в ячеистой структуре смесей нарушается при разбавлении их кислородом. Причем CO более устойчив к разбавлению окислителем, нежели H_2 и C_2H_2 . Это проявляется в возникновении более крупных возмущений в ячейках по сравнению с H_2 и C_2H_2 . На рис. 1 приводится фотография торцевого отпечатка детонационного фронта $2\text{H}_2 + 8\text{O}_2$. При добавлении к стехиометрической водородно-кислородной смеси семи молей кислорода наблюдается (см. рис. 1)¹ не только увеличение в размерах крупных ячеек, но и появление в некоторых из них как очень мелких, так и более крупных неоднородностей.

При обогащении стехиометрической смеси горючим тонкая структура в неоднородностях фронта также появляется, но в меньшей степени по сравнению со смесями с большим избытком окислителя. Аналогичный результат наблюдался и при разбавлении стехиометрических кислородных смесей CO , H_2 и C_2H_2 азотом или двуокисью углерода. На



Рис. 1.



Рис. 2.

¹ В опытах, приведенных на рис. 1—4, $d=80$ см, начальное давление атмосферное.



Рис. 3.

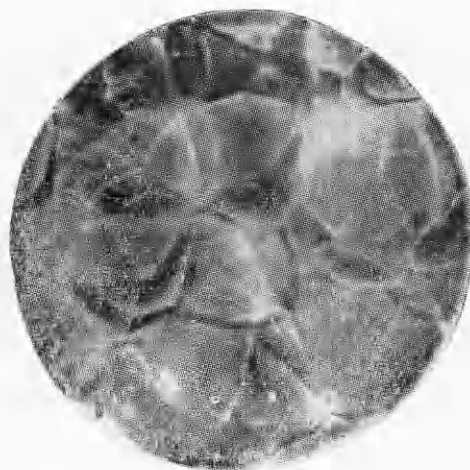


Рис. 4.

рис. 2, где приведена фотография детонационного фронта $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 7\text{N}_2$, и на рис. 3 ($2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 1,5\text{CO}_2$) видно, что наибольший эффект нерегулярности появляется при разбавлении стехиометрической смеси двуокисью углерода. В то же время аргон (рис. 4, $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 22\text{Ar}$) и гелий в качестве разбавителя к указанным смесям не вносят мелко-масштабных возмущений в ячейки детонационного фронта.

Указанные выше алифатические углеводороды, а также этиловый спирт, диэтиловый эфир и бензол даже в стехиометрических смесях с кислородом обнаруживают нерегулярную структуру с мелко-масштабными возмущениями в поперечных волнах фронта детонации (отпечатки подобны рис. 2, 3 и здесь не приводятся).

Если размер неоднородности на фронте детонации можно варьировать, изменяя либо начальное давление смеси, либо диаметр детонационной трубы, либо химический состав взрывчатой смеси, то изменение последнего влияет также и на природу явлений в поперечных волнах. В некоторых случаях это проявляется в ухудшении регулярности (появлении возмущений, сравнимых по размеру с крупной ячейкой), а затем и в появлении мелко-масштабных возмущений в ячейках неоднородного фронта детонации.

Таким образом, большинство газовых смесей, способных к детонации, обнаруживают еще более сложную ячеистую структуру детонационного фронта. О причинах возникновения нерегулярной структуры пока трудно что-либо утверждать.

*Поступила в редакцию
30/XI 1976*

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
2. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиян. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
3. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1940, 10, 542.
4. К. И. Щелкин. УФН, 1965, 87, 2.
5. М. Е. Топчиян, В. Ю. Ульяницкий. ФГВ, 1976, 12, 2.
6. В. И. Манжалей, В. В. Митрофанов. ФГВ, 1973, 9, 5.
7. R. A. Strehlow. Astronautica Acta, 1969, 14, 5.
8. А. А. Васильев, Т. П. Гавриленко и др. ФГВ, 1972, 8, 1.
9. Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1959, 125, 110.