

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ РЕАКЦИИ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ЖИДКИХ ВВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

А. Н. Дремин, О. К. Розанов, И. Г. Коба  
(Москва)

При исследовании механизма детонации в любых средах (газообразных и конденсированных) необходимо знание профиля детонационной волны в целом. Существуют различные способы получения профиля детонационной волны. В газах, например, широко применяются датчики давления, фиксирующие профиль давления в детонационной волне. В конденсированных взрывчатых веществах широкое применение нашли, в основном, метод откола и электромагнитный метод. В последнее время стал применяться также метод, основанный на изменении электрических свойств материалов под действием приложенного давления [1].

Идея откольного метода состоит в измерении первоначальной скорости движения свободной поверхности ( $W$ ) металлических пластин разной толщины ( $l$ ), находящихся в контакте с детонирующим зарядом ВВ. По параметрам ударной волны в точке резкого изменения наклона зависимости  $W=W(l)$  рассчитывается давление в плоскости Чепмена — Жуге и ширина зоны химической реакции в детонационной волне [2, 3]. Точность этого метода несколько снижается вследствие того, что при расчетах не учитывается влияние отражения детонационной волны от инертной преграды. Кроме того, применение откольного метода ограничено рядом условий [4].

Электромагнитный метод основан на законе электромагнитной индукции [4—6]. При движении проводника в магнитном поле в нем наводится э.д.с. ( $\epsilon$ ), которая связана со скоростью движения проводника  $u$ , его длиной  $L$  и напряженностью электромагнитного поля  $H$ . Зная  $H$ ,  $l$  и  $\epsilon$ , легко определить скорость движения проводника. В качестве проводника (будем называть его датчиком) обычно используется алюминиевая фольга, согнутая в форме буквы «П», длина перекладины которой является рабочей длиной. Датчик помещается в исследуемое ВВ таким образом, чтобы перекладина его была строго перпендикулярна направлению распространения детонации.

Применение этих двух методов позволило установить, что на фронте детонационной волны в твердых ВВ существует область повышенных давлений, как это предсказывалось гидродинамической теорией детонации. Кроме того, были найдены параметры детонационной волны и определена ширина этой области повышенных давлений, что дало возможность оценить время химической реакции при детонации большого числа твердых ВВ. Измеренные времена реакций лежат в пределах 0,16—0,85 мксек [4].

Относительно времени реакции при детонации жидких ВВ точных данных не имеется. В работе [7] с помощью откольного метода была сделана попытка определить параметры детонации в плоскости Чепмена — Жуге в нитрометане и нитроглицерине. Полученная прямолинейная зависимость  $W=W(l)$  вплоть до пластин толщиной в 2 мм экстраполировалась до пластин нулевой толщины, что позволило приблизительно оценить параметры детонационной волны в плоскости Чепмена — Жуге в предположении, что время реакции в этих жидких ВВ очень мало.

В результате ряда работ, выполненных в последнее время [8—11], установлено, что ударный фронт детонационной волны в ряде жидких ВВ не является гладким, как

предполагается в гидродинамической теории детонации. По нему, как и в газах [12, 13], перемещаются трехмерные конфигурации (неоднородности).

Фоторазвертка процесса распространения детонации в торец заряда имеет полосатый сетчатый характер. Типичные записи приведены в работах [8, 10] (см. также рис. 2).

Расстояние между полосами дает в среднем расстояние между неоднородностями по фронту (размер неоднородностей  $\Delta_x$ ). Установлено, что размер  $\Delta_x$  зависит от диаметра содержащей жидкое ВВ оболочки и от состава смеси, например от концентрации инертной добавки — ацетона в смеси с нитрометаном [9]. Показано [11], что размер неоднородностей в направлении распространения детонации  $\Delta_y$ , характеризующий шероховатость фронта, приблизительно на порядок меньше размера  $\Delta_x$ .

В связи с этим представляло интерес исследовать, существует ли зона повышенных давлений (а следовательно, и массовых скоростей) во фронте детонационной волны и оценить время существования этой зоны при детонации жидких ВВ. Это время, по-видимому, логично было бы отождествить с суммарным временем реакции  $\tau_*$ . Связь  $\tau_*$  с размером  $\Delta_x$  позволила бы более строго подходить к построению структуры самой детонационной волны.

### Взаимодействие детонационной волны с преградой

Прежде чем приступить к непосредственному измерению профиля массовых скоростей в детонационной волне электромагнитным методом, был исследован процесс взаимодействия детонационной волны с различными преградами. В исследуемое жидкое ВВ на одном уровне помещались преграды либо из разного материала, либо из одного материала, но разной толщины. Фотографирование распространения детонации по заряду производилось на приборе СФР с торца заряда через щель. Если преграда была из непрозрачного материала, например из металла, то она вырезала из общего фона свечения детонационной волны полосу, равную своей ширине.

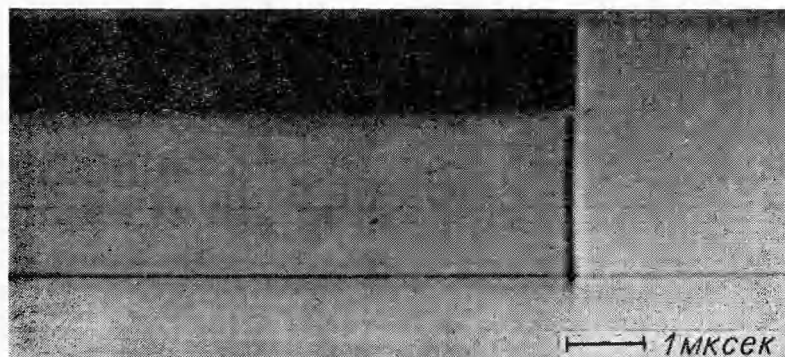


Рис. 1.

В случае, представленном на рис. 1, в чистом нитрометане находились полоска алюминиевой фольги толщиной 0,035 и шириной 10 мм и слюда толщиной 0,04 и шириной 20 мм. Отсутствие свечения непосредственно за слюдой и возникновение затем более яркого свечения, переходящего в нормальное свечение детонационного фронта, говорит о том, что детонация за слюдой возникла не сразу, а спустя некоторое время задержки  $\tau_{\text{зад}} \approx 0,15$  мксек. Происходит процесс, аналогичный процессу инициирования детонации в жидких ВВ ударной волной. На границе раздела исследуемое жидкое ВВ — преграда, из которой выходит инициирующая ударная волна, спустя  $\tau_{\text{зад}}$  возникает реакция. Двигаясь по сжатому ударной волной веществу со скоростью, превышающей нормальную скорость детонации, и имея крутой, резкий фронт [14], эта реакция догоняет ушедшую вперед ударную волну. В момент догона в невозмущенном ВВ создаются повышенные по сравнению с нормальной детонацией давления, что приводит к повышению температуры и усилению свечения [14, 15]. Это свечение и фиксируется в виде яркой полосы как за слюдой, так и за фольгой. Одновременность возникновения его за обеими преградами свидетельствует о том, что  $\tau_{\text{зад}}$  за фольгой по своей величине равно времени задержки за слюдой.

На рис. 2 показано взаимодействие детонационной волны с алюминиевыми фольгами толщиной 0,035 мм и 0,22 мм в смеси нитрометана с ацетоном, взятых по объему 75 : 25. Смесь содержалась в цилиндре из медной фольги с толщиной стенок 0,5 мм,

Высота цилиндра до места нахождения алюминиевых фольг составляла 180 мм, диаметр цилиндра равнялся 80 мм. Хорошо видно, что в отличие от рис. 1 свечение детонационного фронта имеет полосатый, сетчатый характер. Размер неоднородностей  $\Delta_x$  в этом случае  $\approx 1,5$  мм [9]. При таком сравнительно большом размере неоднородностей за фольгой толщиной 0,035 мм не наблюдается задержки детонации, нет характерной яркой полосы, как в случае чистого нитрометана. Неоднородности проходят сквозь такую фольгу, не изменяя своего размера и скорости. (Скорость неоднородностей характеризуется наклоном полос). Можно сказать, что детонационная волна почти не замечает подобной преграды. Взаимодействие детонационной волны с фольгой толщиной 0,22 мм также имеет свои особенности. Здесь тоже не наблюдается характерной яркой полосы, говорящей о задержке детонации, но уже потому, что прежде, чем под действием вышедшей из фольги ударной волны возникнет детонация, вся фольга обтекается детонационной волной. В месте встречи этих волн возникает очень яркое свечение, свидетельствующее о большом подъеме давления и температуры. Время обтекания измеряется от момента образования волны отсутствия реакции (тонкие черные полосы в виде «усов») до момента встречи детонационных волн и равно 1,05 мксек.

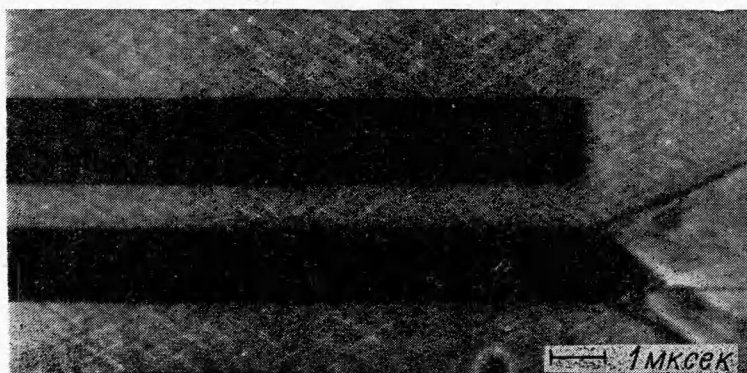


Рис. 2.

Обращает на себя внимание следующий факт, вытекающий из сравнения этих двух экспериментов. Размер неоднородностей  $\Delta_y$  приблизительно на порядок меньше размера  $\Delta_x$ . В чистом нитрометане  $\Delta_x$  непосредственно измерить не удастся из-за малой разрешающей способности используемой аппаратуры. Его оценку можно произвести косвенными путями. Полученное при этом значение равно 0,2—0,3 мм [9, 16]. Поэтому значения  $\Delta_x$  для чистого нитрометана составляют 0,02—0,03 мм, т. е. меньше или в крайнем случае сравнимы с толщиной фольги, равной 0,035 мм. Размер  $\Delta_y$  в эксперименте, представленном на рис. 2, составляет  $\approx 0,15$  мм, что тоже меньше 0,22 мм, но значительно превосходит другую толщину фольги. Так как только в этом последнем случае детонационная волна прошла сквозь фольгу без задержки, то можно утверждать, что условием этого является малость толщины фольги по сравнению с размером неоднородностей  $\Delta_y$ . Когда же толщина фольги сравнима или больше размера неоднородностей  $\Delta_y$ , за фольгой будет наблюдаться задержка детонации. Величина этой задержки должна, естественно, зависеть как от толщины и материала фольги, так и от реакционно-кинетических свойств данного ВВ.

### Электромагнитные измерения массовых скоростей

В зависимости от соотношения между размером неоднородностей  $\Delta_y$  и толщиной перекладины электромагнитного датчика, последний должен фиксировать различные процессы. Если датчик выбран тонким, т. е. толщина его перекладины в несколько раз меньше размера неоднородностей  $\Delta_y$ , то фиксируется профиль массовых скоростей в детонационной волне (см. рис. 4). В чистом нитрометане тонким датчиком явился бы датчик толщиной порядка  $10^{-3}$  мм, о чем свидетельствуют следующие экспериментальные результаты [17].

На торец сосуда с нитрометаном накладывалась алюминиевая фольга толщиной 0,0075 мм, которая освещалась лучом света от постороннего источника. В момент прихода детонационной волны на фольгу от нее наблюдалось рассеяние света. Если бы неоднородности полностью гибли на такой толщине, то поверхность пластины оставалась бы

лась бы гладкой и от нее должно было бы наблюдаться только регулярное отражение света. Если электромагнитный датчик толстый (датчик толщиной 0,22 мм в смеси нитрометана с ацетоном (75 : 25) и оба датчика в чистом нитрометане), то фиксируется либо процесс распространения за датчиком ударной волны с последующим распространением реакции, либо процесс обтекания датчика детонационной волной.

Рассмотрим осциллограммы, соответствующие последнему случаю. На рис. 3 представлены типичные электромагнитные записи, полученные на датчиках в чистом нитрометане: а) толщиной 0,035 мм, б) толщиной 0,22 мм и в) толщиной 0,22 мм в смеси нитрометана с ацетоном (75 : 25).

Чистый нитрометан содержался в картонных цилиндрах диаметром 60 мм. Рабочая длина датчика во всех случаях равнялась 10 мм. Амплитуда первого максимального отброса (точка 1) соответствует массовой скорости в ударной волне, распространяющейся за датчиком. В течение некоторого времени амплитуда отброса остается постоянной.

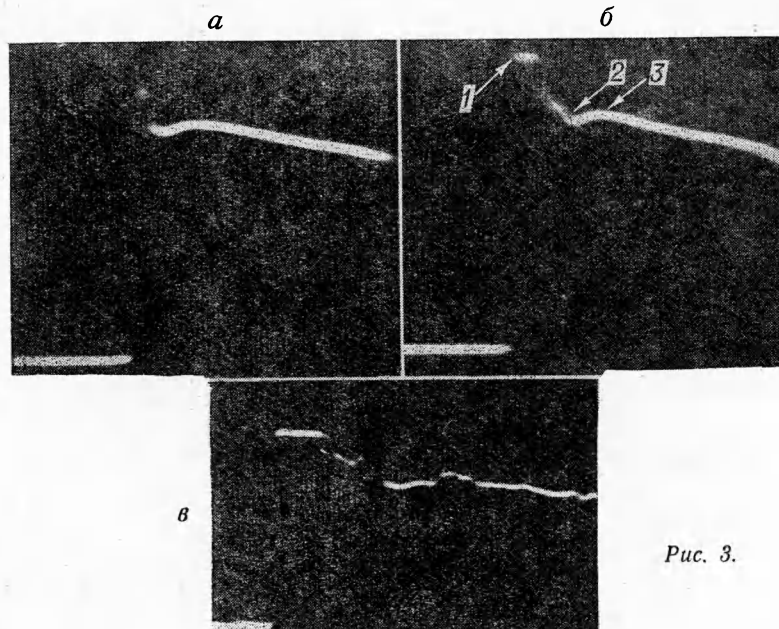


Рис. 3.

Затем начинается резкий спад (до точки 2), обусловленный возникающей за датчиком реакцией. После этого амплитуда несколько возрастает (до точки 3), что связано, по-видимому, с тем, что датчик увлекается продуктами возникшей реакции и затем начинает плавно убывать (рис. 3а, б). На рис. 3в приводится запись процесса обтекания датчика детонационной волной. Использование в этом случае металлической оболочки приводит к появлению наводок, поэтому запись является менее четкой, нежели на рис. 3а, б. Хорошо видно, что после некоторого постоянства массовой скорости, соответствующей амплитуде точки 1, начинается спад до точки 2.

Время  $\tau_{уд}$  от начала записи до точки наибольшего торможения датчика (точки 2) довольно хорошо совпадает с  $\tau_{зад}$ , фиксируемом на фоторазвертках. Так, например,  $\tau_{уд}=0,17$  мксек на рис. 3а, а из рис. 1  $\tau_{зад}=0,15$  мксек. За датчиком толщиной 0,22 мм в чистом нитрометане задержка инициирования детонации возрастает и составляет 0,45 мксек. Такое же время фиксируется и на электромагните:  $\tau_{уд}=0,5$  мксек на рис. 3, б. На рис. 3, в  $\tau_{уд}=1,0$  мксек, а время обтекания датчика детонационной волной составляет 1,05 мксек (см. рис. 2). Различие в величине  $\tau_{зад}$ , наблюдаемое в чистом нитрометане, за датчиками разной толщины объясняется, по-видимому, тем, что от толщины зависит интенсивность выходящей из датчика ударной волны. Массовая скорость в ударной волне за тонким датчиком больше. Следовательно, можно считать, что роль датчика в этих случаях сводится к тому, что он как бы срезает повышенные давления, соответствующие зоне реакции детонационной волны (частично или полностью в зависимости от его толщины), и создает разрыв, с одной стороны которого находятся продукты взрыва, а с другой — невозмущенное жидкое ВВ.

Зная массовую скорость в продуктах взрыва и ударную адиабату нереагирующего жидкого ВВ, можно теоретически рассчитать массовую скорость за ударной волной в невозмущенном жидком ВВ, получающуюся в результате распада такого разрыва. Расчет основывается на том, что на границе раздела продукты взрыва — жидкое ВВ

осуществляется равенство давлений  $p$  и массовых скоростей  $u$ . С одной стороны связь между  $p$  и  $u$  находится из рассмотрения волны разряжения в продуктах взрыва, с другой — она задается ударной адиабатой. Решая совместно получающиеся два уравнения, находятся значения  $u$  и  $p$  на границе раздела. За значение  $a$  в продуктах взрыва для чистого нитрометана принимается величина, равная массовой скорости в точке 3 рис. 3,  $a, u_{пв} = 1,84$  км/сек. Для смеси нитрометана с ацетоном (75 : 25) за  $u_{пв}$  берется величина, средняя между  $u_1$  и  $u_2$  из рис. 4, что составляет 1,77 км/сек.

Ударная адиабата чистого нитрометана заимствована из работы [18], для смеси нитрометана с ацетоном — из работы [19]. Сравнение теоретически рассчитанных  $u$  с экспериментально измеренными массовыми скоростями за ударной волной, выходящей из датчика (см. рис. 3), дает хорошее совпадение. Так, например, из записи на рис. 3,  $v$  имеем  $u_1 = 1,82$  км/сек, расчет дает  $u = 1,86$  км/сек.

Профиль массовых скоростей детонационной волны в смеси нитрометана с ацетоном (75 : 25), полученный на тонком датчике, представлен на рис. 4. Характер записи совпадает с записями, имеющими место при детонации твердых ВВ [6]. Видно, что существует зона повышенных массовых скоростей. Значение массовой скорости на фронте, проэкстраполированное к началу записи, составляет  $u_1 = 2,04$  км/сек. В точке 2, где имеет резкий перегиб в характере записи, значение массовой скорости равно  $u_2 = 1,51$  км/сек. Время от начала записи до точки резкого перегиба, отождествляемое с суммарным временем реакции  $\tau^*$  составляет  $\approx 0,4$  мсек. Отсюда можно оценить и ширину зоны этой реакции по формуле

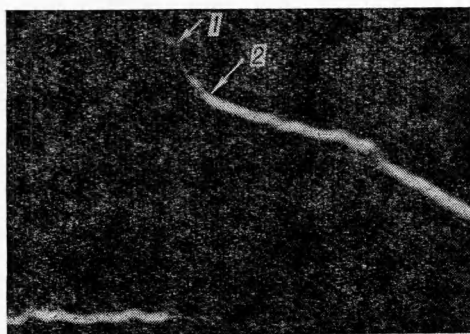


Рис. 4.

$$a = \tau_*(D - \bar{u}),$$

где  $D$  — скорость детонации,  $\bar{u}$  — средняя массовая скорость в зоне. Для смеси

нитрометана с ацетоном (75 : 25)  $D = 5,75$  км/сек,  $\bar{u}$  берется средним между  $u_1$  и  $u_2$  и равняется 1,77 км/сек. Подстановка этих значений дает  $a \approx 1,6$  мм. Очевидно, повышенные давления этой зоны не успевают полностью затухнуть на толщине датчика, равной 0,22 мм, и поэтому при расчете распада разрыва в этой смеси массовая скорость приближенно выбиралась средней между  $u_1$  и  $u_2$ .

Суммарное время реакции в чистом нитрометане непосредственно измерить не удавалось. Его можно оценить, если принять, что между  $a$  и  $\Delta_x$  существует пропорциональная зависимость. Для смеси нитрометана с ацетоном (75 : 25)  $\Delta_x = 1,5$  мм,  $a = 1,6$  мм, для чистого нитрометана  $\Delta_x \approx 0,25$  мм. Отсюда в чистом нитрометане  $a \approx 0,26$  мм, что соответствует  $\tau_* \approx 0,06$  мсек.

Зависимость  $\Delta_x$  от  $\tau_*$  не была получена по следующим причинам. Как показали опыты на СФР, даже в смесях нитрометана с ацетоном (84 : 16) за датчиком толщиной 0,035 мм существует задержка детонации, тем самым  $\tau_*$  определить не удастся. Смеси с большим содержанием ацетона (30% и больше) детонируют стационарно при значительно больших диаметрах и при использовании толстостенных оболочек, что не позволяет их применять из-за соображения сохранности самого электромагнита.

Поступила в редакцию  
2/II 1965

#### ЛИТЕРАТУРА

1. F. E. Alison. IX Symp. on Comb., 1963, 480.
2. R. E. Duff, E. Houston. J. Chem. Phys., 1955, 23, 7.
3. А. Н. Дремин, П. Ф. Похил. Ж. физ. хим., 1960, 34, 11.
4. А. Н. Дремин, К. К. Шведов. ПМТФ, 1964, 2.
5. В. М. Зайцев, П. Ф. Похил, К. К. Шведов. Докл. АН СССР, 1960, 132, 6.
6. А. Н. Дремин, К. К. Шведов, В. А. Веретенников. Сб. Взрывное дело, 1963, № 52/9.
7. А. Н. Дремин, П. Ф. Похил. Докл. АН СССР, 1959, 128, 5.
8. А. Н. Дремин, О. К. Розанов. Докл. АН СССР, 1961, 139, 1.
9. А. Н. Дремин, О. К. Розанов, В. С. Трофимов. ПМТФ, 1963, 1.
10. А. N. Dremín, O. K. Rozanov, V. S. Trofímov. Comb. and Flame, 1963, 7, 2.
11. С. Н. Буравова, А. Н. Дремин, О. К. Розанов, В. С. Трофимов, ПМТФ, 1963, 4.



12. К. И. Шелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. Изд-во АН СССР, 1963.
13. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиян. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
14. А. Н. Дремин, С. Д. Савров, А. Н. Андриевский. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 2.
15. A. W. Campbell, W. E. Davis, J. R. Travis. Phys. Fluids, 1961, 4.
16. А. Н. Дремин, О. К. Розанов. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 2.
17. V. G. Craig. IX Symp. on Comb., 1963, 477.
18. В. С. Илюхин, П. Ф. Похил, О. К. Розанов, Н. С. Шведова. Докл. АН СССР, 1960, 131, 4.
19. А. Н. Дремин, О. К. Розанов. Изв. АН СССР, серия хим. наук, 1964, 8.

## К ВОПРОСУ О ВЕДУЩЕЙ СТАДИИ ГОРЕНИЯ

Н. Н. Бахман

(Москва)

Экспериментально установлено, что во многих случаях горение конденсированных систем протекает в нескольких пространственно-разделенных стадиях.

В ряде работ [1, 2] высказано предположение, что при многостадийном горении одна ведущая стадия определяет скорость горения. Остальные, подчиненные стадии, подстраиваются под эту скорость. Это предположение убедительно для случая плоского фронта горения, который только и рассматривался в упомянутых выше работах. Действительно, для плоского фронта горения при заданной температуре и составе реагентов имеется единственное значение скорости горения [3]. Если ввести каталитическую добавку, которая увеличивает скорость превращения исходного вещества в полупродукты, не меняя их температуру и состав, то зона ведущей реакции начнет сноситься возросшим потоком полупродуктов по направлению от поверхности заряда до тех пор, пока в результате уменьшения теплового потока от ведущей стадии скорость подчиненной стадии вновь возвратится к первоначальному значению. Изменится при этом лишь профиль температур по всей зоне горения, в частности уменьшится температура на поверхности заряда.

Иначе обстоит дело в случае неоднородного горения, которое характерно для конденсированных смесей при размере частиц больше некоторого минимального [4], а также для гомогенных систем, при горении которых образуется конденсированный остаток. Здесь заданной температуре и составу реагентов уже не отвечает единственное значение скорости горения, так как имеется еще один независимый параметр — поверхность фронта горения на единицу площади поперечного сечения потока. Для таких систем наличие одной ведущей стадии не может быть характерным.

В качестве примера рассмотрим довольно обычный для конденсированных смесей случай, когда один из компонентов (чаще окислитель) способен к самостоятельному горению, а второй компонент газифицируется под влиянием теплового потока извне. Полупродукты, образовавшиеся при горении окислителя, смешиваются с полупродуктами, образовавшимися при газификации горючего, и образуют диффузионное пламя.

Введем каталитическую добавку, ускоряющую горение окислителя, но не меняющую температуру и состав полупродуктов. Это немедленно должно изменить форму поверхности заряда и форму диффузионного пламени. Пусть, например, газификация горючего и окислителя завершалась первоначально в одной и той же плоскости. После введения добавки, которая активизирует разложение окислителя, но не влияет на газификацию горючего, частицы окислителя будут образовывать впадины, а частицы горючего — выступы. Соответственно изменится форма диффузионного пламени. Изменится и скорость горения, так как нет никакого условия, согласно которому она оставалась бы постоянной при двух различных конфигурациях зоны горения.

Что касается диффузионного пламени, то оно также не является подчиненной стадией. Прямые опыты (см. [5] и др.) показывают, что при изменении скорости диффузионного пламени за счет изменения дисперсности компонентов меняется скорость горения в целом.

Таким образом, скорость неоднородного многостадийного горения не определяется процессами, идущими в какой-либо одной стадии.

Поступила в редакцию  
30/XI 1964