

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

№ 1

1965

*А. Ф. Беляев, Ю. А. Кондрашков, Г. В. Лукашья,  
А. К. Парфенов, С. А. Цыганков*  
(Москва)

## О ФАКЕЛЬНОМ ГОРЕНИИ МОДЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ ОКИСЛИТЕЛЯ И ГОРЮЧЕГО

Зависимость скорости горения взрывчатых веществ и порохов от давления принято выражать формулой  $u = bp^v$ . У многих простейших двухкомпонентных смесей окислителя и горючего в интервале давлений 1—100 ата  $v \sim 0,3—0,7$ . Вместе с тем показано [1, 2], что при давлениях меньших атмосферного зависимость  $u(p)$  смесей может быть простой линейной ( $v \approx 1$ ).

Авторами были измерены скорости горения некоторых смесевых систем при давлениях ниже атмосферного; опыты проводились под стеклянным колоколом. Компоненты смесей интенсивно измельчались (до 10—20 мк), тщательно смешивались и запрессовывались до относительной плотности, составлявшей  $\sim 0,98$  от теоретической максимальной плотности системы.

Результаты опытов приведены на рис. 1. Здесь показана зависимость скорости горения от давления для: 1 — стехиометрической смеси перхлората аммония и тротила; 2 — стехиометрической смеси перхлората калия и тротила; 3 — стехиометрической смеси перхлората аммония и битума; 4 — стехиометрической смеси перхлората аммония и параформальдегида [2]; 5 — системы из перхлората аммония (80%) и связи (20%) из полистирола и полиэфира [1]. Эти системы различны по составу и структуре. Использованы разные окислители, разное горючее, системы прессованные и с полимерной связкой. Тем не менее для всех этих систем при давлениях меньших атмосферного зависимость  $u(p)$  является простой линейной  $u = bp$ . Отметим, что смеси перхлората аммония с тротилом и перхлората калия с тротилом при давлениях ниже атмосферного имеют весьма близкие

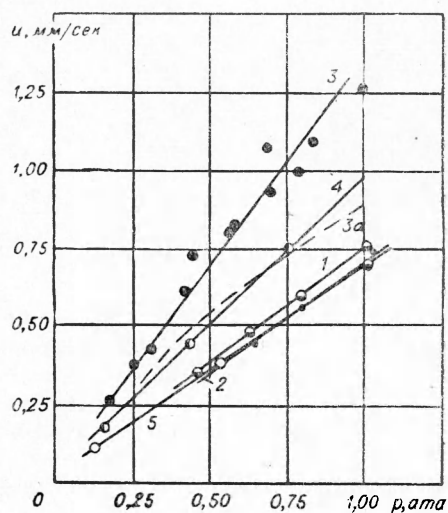


Рис. 1.

абсолютные значения скорости горения, несмотря на существенное отличие состояния поверхностного слоя конденсированной фазы (перхлорат калия плавится и образует жидкий слой; перхлорат аммония не плавится, а сублимирует или разлагается). Кривая  $3a$  — это  $u(p)$  системы, аналогичной  $3$  (с битумом), но с частицами окислителя  $250 \text{ мк}$  вместо  $10\text{--}20 \text{ мк}$ . Зависимость смеси слабее линейной ( $u \sim p^{0,7}$ ). При использовании в качестве горючего углерода зависимость  $u(p)$  также слабее линейной [2].

Таким образом, простую линейную зависимость при давлениях меньших атмосферного дают системы, компоненты которых интенсивно измельчены и тщательно смешаны; горючее должно быть способным (хотя бы при высоких температурах) к газификации путем разложения, пиролиза, испарения.

Отметим теперь, что при давлениях в сотни атмосфер  $u(p)$  смесевых систем также может быть близка к линейной. Такой результат, в частности, был получен [3] при проведении опытов в устройстве, представляющем собой разновидность манометрической бомбы с записью давления пьезоэлектрическим датчиком.

На рис. 2 дано  $u(p)$  (в интервале давлений  $500\text{--}1500 \text{ ата}$ ) для стехиометрических смесей: 1 — перхлората аммония и тротила; 2 — перхлората калия и тротила. Разброс точек велик, но несомненно, что зависимость и для 1 и для 2 является сильной ( $\nu=0,9\text{--}1,0$ ). Приблизительно можно положить  $u=b'p$ , причем  $b' < b$  ( $b/b' \sim 7$  для смесей с перхлоратом аммония и  $\sim 5,5$  — с перхлоратом калия). Также близка к линейной (в интервале давлений  $300\text{--}1000 \text{ ата}$ )  $u(p)$  смеси перхлората

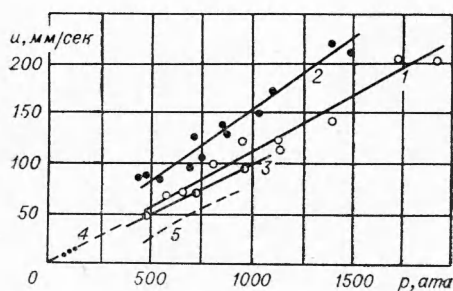


Рис. 2.

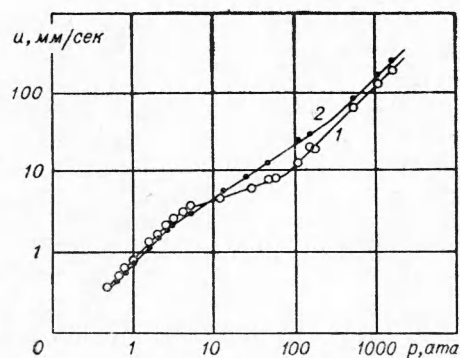


Рис. 3.

калия с битумом. Данные А. П. Глазковой и И. А. Терешкина [4] (прямая  $3$ ), полученные для запрессованной смеси перхлората аммония с парафином в бомбе постоянного давления, хорошо укладываются в простой линейный закон.

На рис. 3 скорости горения и давления даны в логарифмическом масштабе, использование которого позволяет отложить на одном графике данные малых ( $p < 1$ ) и больших ( $p > 100$ ) давлений. Здесь показано  $u(p)$  для смесей: 1 — тротила с перхлоратом аммония; 2 — тротила с перхлоратом калия. При малом и большом давлениях угол наклона прямых  $\sim 45^\circ$ , а это значит, что  $\nu=1$ . Значения скоростей горения в большом диапазоне давлений ( $\sim 4$  порядка) определялись в разное время и разными методами. Данные при  $p > 500 \text{ ата}$  получены в бомбе переменного давления с пьезодатчиками (на график нанесены усреднен-

ные точки); данные в интервале 5—150 *ата* — в стандартной бомбе постоянного давления (с пьезодатчиками); данные в интервале 1—5 *ата* — в бомбе постоянного давления с ресивером; данные при  $p < 1$  *ата* — с использованием крупных колоколов и ресивера. Тем не менее для каждой системы точки хорошо увязываются и укладываются в свою определенную закономерность.

Из графика непосредственно следует, что линейный закон «малого давления» сохраняется до 2,5—3,0 *ата*, а линейный закон «большого давления» начинается от 100 *ата* (смесь с перхлоратом аммония) и 250 *ата* (смесь с перхлоратом калия). Весьма важным непосредственным выводом является то, что в интервале давлений от 2,5—3,0 до 100—250 *ата* ( $\nu < 1$ ) происходит постепенный переход от линейного закона «малого давления» к линейному закону «большого давления». При этом у смеси с перхлоратом аммония (1) переход совершается быстрее (на меньшем интервале давлений). У смеси (1)  $\nu = 0,35$  и у смеси (2)  $\nu \cong 0,65$ .

Остановимся на некоторых вопросах механизма горения, которые могут объяснить полученные результаты. Отмечалось [5, 6], что если компоненты смеси интенсивно измельчены, тщательно смешаны и способны к газификации, а горение идет при низком давлении, то продукты распада окислителя и горючего успевают полностью смешаться до момента развития реакции в образовавшейся газовой смеси. Процесс идет в кинетическом режиме, фронт горения близок к плоскому и  $u(p)$  выражается той же зависимостью, что и для однородных испаряющихся веществ. Таким образом, линейная зависимость при малых давлениях находит простое и естественное объяснение. Что касается линейного закона

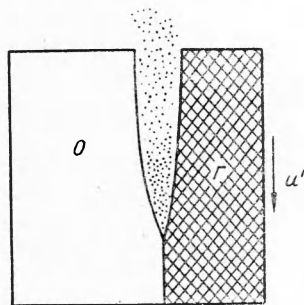


Рис. 4.

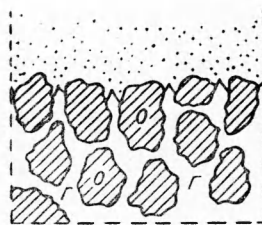


Рис. 5.

при больших давлениях, то его следует объяснять с учетом свойств интересного вида горения, описанного Н. Н. Бахманом [7, 8].

Если сложить пластину окислителя (О) и пластину горючего (Г), то при поджигании в зоне контакта возникает факел пламени, нижняя часть которого находится в образовавшейся клиновидной (асимметричной) выемке (рис. 4). «Носик» факела распространяется со скоростью  $u'$  вдоль контакта, причем эта скорость задается процессом у самого «носика». Выше над «носиком», где выемка расширяется, реакция продуктов распада окислителя и горючего лимитируется диффузией. (При достаточно большом расстоянии между окислителем и горючим реакция вообще прекращается, и удаленные слои окислителя и горючего остаются несгоревшими.) Однако в «носике» факела окислитель и горючее контактируют, и реакция протекает в кинетическом режиме [6, 11]. Вместе с тем при наличии факела условия существенно отличаются от условий плоского фронта. Из-за значительных теплотерь в условиях «носика» должны снижаться температура и скорость перемещения «носика»

факела  $u' < u$ , где  $u$  — скорость горения в условиях образования плоского фронта, когда продукты распада окислителя и горючего успевают полностью смешаться до реакции. Весьма важным является факт линейной зависимости  $u' = b''p$ , установленной для случая контакта перхлората калия с горючим, способным к газификации [7].

На рис. 2 (прямая 4 при  $p < 150 \text{ ата}$ ) показана  $u'$  для системы  $\text{KClO}_4$  — плексиглас [7] (условия опыта аналогичны описанным для рис. 4). Экстраполяция этих данных на высокие давления дает значения скоростей, в общем близкие к установленным нами. В работе [4] приведены данные об  $u(p)$  перхлората аммония как в инертных, так и горючих оболочках. Наибольшая скорость была получена в горючей оболочке из плексигласа толщиной  $\sim 1 \text{ мм}$ . В этих условиях, по существу, возникает граничное горение, рассмотренное Н. Н. Бахманом, в виде кольцевого факела. Результаты работы [4] перенесены на график рис. 2 в виде кривой 5, которая (особенно при наивысших давлениях) близка к кривым 1 и 3.

Следует добавить, что если при низких давлениях наблюдаемый фронт горения действительно является плоским, то при повышенных он становится неоднородным и приобретает «факельную» структуру.

У смесового топлива при высоких давлениях фронт горения имеет «многофакельную» структуру [8], схематически показанную на рис. 5 (О — частицы окислителя, Г — прослойки горючего). Скорость распространения пламени определяется средней скоростью распространения «носиков». Следовательно, при высоких давлениях имеем дело не со скоростью распространения плоского пламени  $u$ , а преимущественно со скоростью распространения пограничного горения  $u'$ . «Многофакельный» фронт должен несколько отличаться от случая одиночного факела. С одной стороны, при переходе от одного зерна окислителя к другому пламя должно распространяться через перемычку горючего, с другой стороны, отдельные «носики» должны взаимодействовать и ускорять друг друга; в частности, должны взаимодействовать «носики», расположенные по сторонам горючих перемычек, поскольку размер последних меньше, чем размер зерен окислителя. Возможно, поэтому при одинаковых давлениях скорость распространения «многофакельного» горения немного (примерно в 1,5 раза) выше «однофакельного» граничного горения.

При давлениях выше 1000—2000 ат характер  $u(p)$  снова меняется в сторону ослабления этой зависимости. Объясняется это тем [8], что по мере повышения давления угол «носика» факела (см. рис. 4) уменьшается. По-видимому, когда это уменьшение достигает некоторого критического значения, реакция в «носике» уже не может обеспечить увеличение скорости горения при дальнейшем увеличении давления. Дальнейший рост скорости происходит лишь при воздействии диффузионной зоны, примыкающей к «носику». Поскольку реакция, идущая в диффузионном режиме, относительно слабо зависит от давления, то это и дает слабую зависимость скорости горения от давления при весьма высоких давлениях.

Б. В. Новожилов [9] искал переход от кинетического режима к диффузионному при давлениях в несколько атмосфер, однако в работе совершенно не учитывалось возникновение «факельного» горения, которое обеспечивает кинетический режим (правда, в специфической форме граничного горения) даже при весьма высоких давлениях. Действительный переход на диффузионный режим с характерной для него слабой зависимостью от давления, по-видимому, происходит лишь при давлениях больших 1000—2000 ата.

Суммируя изложенное выше, можно сделать вывод, что в случае простейшей смесевой двухкомпонентной системы окислитель — горючее можно отметить наличие четырех областей с разным законом  $u(p)$ . Поэтому совершенно неверно использование одной универсальной зависимости  $u(p)$  при всех давлениях, хотя бы и в виде усложненного двухчлена  $u = A + bp^v$  с тремя параметрами.

Принципиальная схема изменения зависимости  $u(p)$  смесевой системы дана на рис. 6 (сплошная линия). График показывает только качественное наличие областей без соблюдения масштаба. Предполагается, что компоненты топлива достаточно интенсивно измельчены и способны газифицироваться.

Область  $A$  — это область плоского фронта пламени и линейной зависимости при малом давлении  $u = bp$  ( $v = 1$ ). Она начинается от давления, при котором становится возможным горение, и может простираться до давления в несколько атмосфер.

Область  $B$  — это область постепенного перехода от плоского фронта ( $A$ ) к факельному фронту ( $B$ ); в этой области, лежащей в интервале от нескольких атмосфер до 100—200 *ата*,  $u = pb^v$ ,  $v < 1$ .

Область  $B$  — это область факельного фронта горения и линейной зависимости  $u(p)$  при большом давлении (в интервале от 100—200 до 1000—1500 *ата*)  $u = b'p$  ( $b' < b$ ).

Область  $\Gamma$  — это область при давлениях выше 1000—1500 *ата*, где скорость горения лимитируется скоростью диффузии в факелах; зависимость  $u(p)$  слабая ( $u = bp^v$ ,  $v < 0,3 - 0,4$ ). Пунктиром на рис. 6 показана  $u(p)$  для однородных испаряющихся при горении ВВ (например, тротил или тэн [3]). В этом случае плоский фронт горения и линейный закон «низкого давления» сохраняются до наивысших из применяемых давлений при условии сохранения послойного горения, что обеспечивается высокой плотностью заряда. При наивысших давлениях в несколько тысяч атмосфер зависимость  $u(p)$  однородных испаряющихся систем и систем смесевых резко различается.

Указанная схема «областей» для простейшей двухкомпонентной системы является «демонстрационной». Она может измениться при изменении условий и физического состояния. Так, например, приведенная схема предполагает, что частицы компонент смеси порядка 10—20 *мк*. Если частицы увеличивать (на порядок и более), то область  $A$  исчезает (при самых низких давлениях фронт горения уже не будет плоским), интервал давлений  $B$  сместится, значение  $v$  может измениться. Некоторые изменения могут произойти и в области  $B$ . Существенно может повлиять изменение других характеристик системы, и в частности свойств компонент.

Приведенные опыты (особенно в широком диапазоне давлений) были выполнены с тротилом в качестве горючего; он испаряется при горении и легко газифицируется. Если горючее будет нелетучим и трудно газифицирующимся, то указанные закономерности и «области» могут существенно измениться. Не исключено, что область  $A$  вообще исчезнет, хотя она, как было показано, зафиксирована у нелетучей и трудно газифицирующейся полимерной системы из полистирола и полиэфира. В связи с изменением зависимости  $u(p)$  при граничном горении область  $B$  может также существенно измениться.

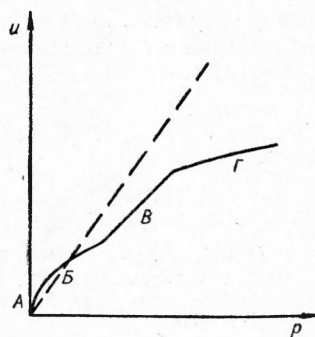


Рис. 6.

Для всех систем при повышенных давлениях следует считаться с возникновением факельного фронта пламени, хотя, возможно, более сложного, чем данная в настоящей статье примитивная схема, и соответственно с более сложным законом  $u(p)$ . Так, например, не учитывалось явление диспергирования [10], роль которого при возникновении факельного фронта пламени существенна, но нуждается в детальном и глубоком изучении. Далее необходимо учитывать, что сам вид зависимости  $u(p)$  для конкретной системы зависит от интервала давления, поскольку с изменением давления может существенно измениться характер фронта горения. При этом с повышением давления зависимость  $u(p)$  может не только ослабляться, но и усиливаться.

Поступила в редакцию  
2/XI 1964

#### ЛИТЕРАТУРА

1. H. Silla. ARS — I, 1961, 31, 9, 1277.
  2. E. A. Arden, I. Powling, W. A. W. Smith. Combustion and Flame, 1962, 6, 1, 21.
  3. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков, А. К. Парфенов, А. А. Сулимов. Ж. физ. химии, 1963, 37, 1, 150.
  4. А. П. Глазкова, И. А. Терешкин. Ж. физ. химии, 1961, 35, 7, 1622.
  5. Н. Н. Бахман, А. Ф. Беляев. Докл. АН СССР, 1960, 133, 4, 866.
  6. Н. Н. Бахман. Докл. АН СССР, 1961, 140, 1, 141.
  7. Н. Н. Бахман. Докл. АН СССР, 1959, 129, 5, 1079.
  8. Н. Н. Бахман, Д. П. Поликарпов. Изв. АН СССР, ОТН. Энергетика и автоматика, 1961, 4, 37.
  9. Б. В. Новожилов. Докл. АН СССР, 1960, 135, 6, 1400.
  10. П. Ф. Похил. О механизме горения бездымных порохов.— Сб. «Физика взрыва», Изд-во АН СССР, 1953, № 2.
  11. Н. Н. Бахман, Ю. А. Кондрашков. Докл. АН СССР, 1962, 142, 2, 377.
-