

**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

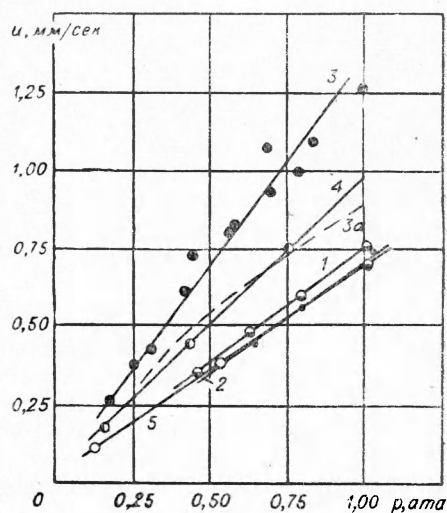


Рис. 1.

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 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

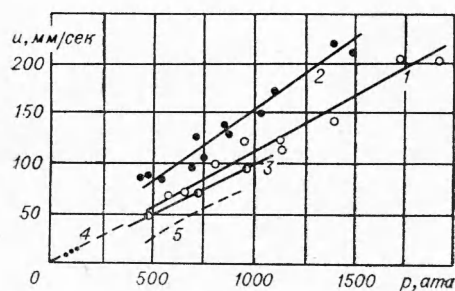


Рис. 2.

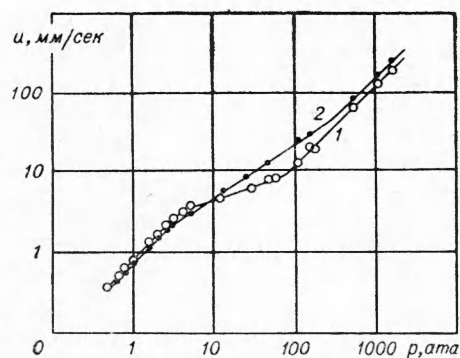


Рис. 3.

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 (~ 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

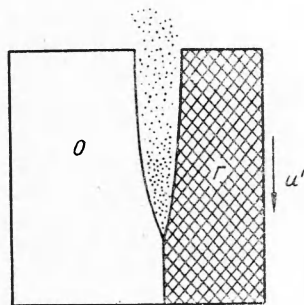


Рис. 4.

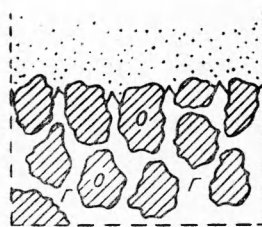


Рис. 5.

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 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 простирается 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 Γ — 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.

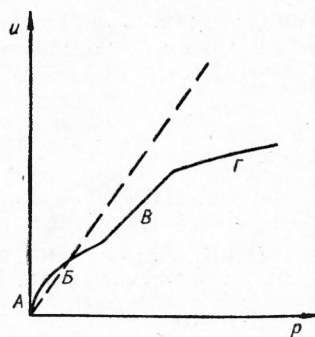


Рис. 6.

