

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Гренишин, А. А. Солодовников, Г. П. Старцев. Измерение температуры пламен и газовых потоков. Тр. комиссии по пирометрии ВНИИМ, № 1, 1957.
2. Н. Н. Соболев, А. В. Потапов и др. Изв. АН СССР, сер. физ., 1958, 22, 730.
3. И. Ш. Модель. ЖЭТФ, 1957, 32, 714.
4. В. К. Прокофьев. Фотографические методы количественного спектрального анализа металлов и сплавов. М., ГТТИ, 1951.
5. А. А. Борисов, А. В. Любимов и др. ФГВ, 1967, 3, 1.
6. К. Миз. Теория фотографического процесса. М., ГТТИ, 1949.
7. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.
8. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.
9. A. V. Gosse, I. V. Conway. Ind. Eng. Chem., 1958, 50, 4.

УДК 536.46

## ГОРЕНИЕ ЖИДКИХ ВВ В ПОЛЕ ИНЕРЦИОННЫХ СИЛ

*С. К. Орджоникидзе, А. Д. Марголин, П. Ф. Похил,  
Е. Ю. Скуридин*

(Москва)

Горение жидких взрывчатых веществ при давлении выше некоторого предельного становится неустойчивым — появляется пульсация горячей поверхности жидкости, скорость горения резко увеличивается. Теорию устойчивости горения жидких ВВ разработал Л. Д. Ландау [1]. Учет стабилизирующего влияния силы тяжести и поверхностного натяжения приводит к выражению для предельной скорости нормального горения [1]:

$$I^4 = \frac{4\alpha \cdot g \cdot \rho_r^2 \cdot \rho_{ж}^2}{\rho_{ж} - \rho_r}, \quad (1)$$

где  $I$  — массовая скорость горения;  $\alpha$  — поверхностное натяжение границы раздела жидкой и газовой фаз;  $\rho_r$  — плотность газообразных продуктов горения;  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости.

Как отмечал К. К. Андреев [2], теоретические выводы теории Л. Д. Ландау и экспериментальные данные в отношении влияния давления на устойчивость горения ряда жидких ВВ в целом хорошо согласуются друг с другом. В настоящей работе с целью выяснения влияния ускорения на предельные условия нормального горения изучалось горение жидких ВВ (дигликольдинитрата, нитрогликоля, метилнитрата и стехиометрической смеси тетранитрометана с бензолом) при ускорениях до  $600 g$  ( $g=980 \text{ см/с}^2$ ) и давлении до 150 ат. Отметим, что Ю. Б. Харитоном было предложено экспериментально проверить критерий Л. Д. Ландау при наличии перегрузок [2], однако до сих пор эта рекомендация не была реализована.

**Методика эксперимента.** Горение жидких ВВ проводилось в бомбе постоянного объема (2 л), где помещалась центрифуга радиусом 45 мм, на которой закреплялась пробирка с жидким ВВ. Длина сжигаемого столбика жидкости составляла 20 мм, диаметр пробирки — 5,5 мм. Существенной частью методики является способ поджигания образца. При поджигании жидкости металлической спиралью систематически возникали взрывы ВВ, сопровождавшиеся разрушением пробирки и

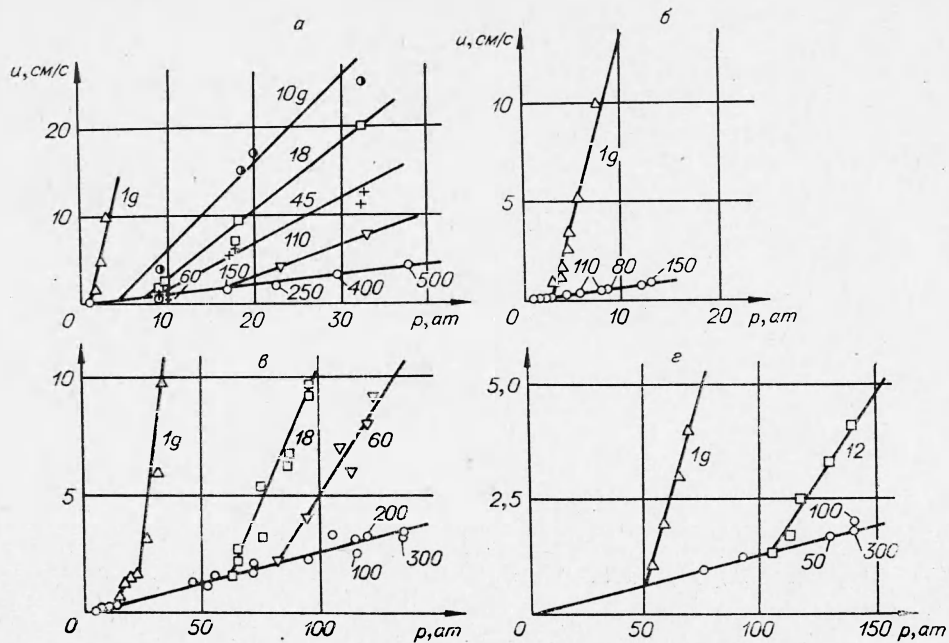


Рис. 1. Зависимость скорости горения метилнитрата (а), тетранитрометана с бензолом (б), нитрогликоля (в) и дигликольдинитрата (г) от давления при различных ускорениях.

близлежащих металлических частей установки. Взрывы возникали и при давлениях ниже предельного при данном ускорении. Причиной взрывов является, по-видимому, появление очага пламени внутри жид-

Таблица 1  
Предельные условия нормального горения

Вещество	$a \cdot 980$ см/с <sup>2</sup>	$u_*$ , см/с	$p_*$ , кг/см <sup>2</sup>
Метилнитрат	1	0,13	1,2
	10	0,55	5
	18	0,77	7
	45	0,99	9
	75	0,99	9
	110	1,87	17
	200	1,98	18
	400	3,6	33
	600	>4,4	>40
Нитрогликоль	1	0,39	15
	18	1,6	62
	35	1,7	65
	55	2,1	80
	60	2,1	82
	200	3,0	115
	300	>3,9	>150
Дигликольдинитрат	1	0,65	50
	12	1,35	105
	20	1,55	120
	23	1,9	145
	300	>1,95	>150
Тетранитрометан с бензолом	1	0,20	3
	150	>0,87	>13

кости. Для устранения причин появления взрывов был разработан специальный метод поджигания. На отверстие пробирки наклеивалась круглая пластинка пороха Н с небольшим выступом над окружностью отверстия пробирки. Последняя заполнялась доверху жидким ВВ без пузырьков шприцем через малое отверстие в пластинке пороха. Нихромовая спираль, расположенная вне пробирки, поджигает выступающую часть пластинки пороха. Тем самым обеспечивается надежное поджигание жидкости с поверхности и исключается пережигание спирали пламенем жидкости и попадание раскаленных кусков спирали в горящую жидкость. При этом методе поджигания взрывы не наблюдались.

Опыты показали, что увеличение ускорения приводит к повышению предельной скорости горения (и давления), выше которой нормальное горение становится неустойчивым (рис. 1, табл. 1). Применяемые ускорения (до 600 g) в пределах точности опытов не влияют на скорость нормального горения (при давлениях ниже предельного). Повышение предельной скорости нормального горения при использовании больших ускорений позволило измерить скорости нормального горения жидких ВВ при давлениях до 150 ат (рис. 1, табл. 2). При

Таблица 2

Скорость нормального горения жидких ВВ

Вещество	Данные эксперимента		Литературные данные	
	закон горения	диапазон давлений, ат	закон горения	диапазон давлений, ат
Метилнитрат	$u=0,11p$	1-40	$u=0,11p$	<2
Тетранитрометан с бензолом	$u=0,067p$	1-15	—	—
Нитрогликоль	$u=0,026p$	1-410	$u=0,025p$	<20
Диглицольдинитрат	$u=0,013p$	50-140	$u=0,013p$	<55

давлениях выше предельного (являющегося функцией ускорения) для исследуемых веществ возникал турбулентный режим горения, скорость распространения которого превышает скорость нормального горения. Начальный участок зависимости скорости турбулентного горения от давления аппроксимируется прямой линией

$$(u-u_*) = k(p-p_*). \quad (2)$$

Ее наклон уменьшается по мере роста предельного давления, т. е.  $\frac{dk}{dp_*} < 0$ . Экспериментальные данные удовлетворительно описываются этой эмпирической формулой с  $k = 36 \left( \frac{u_*}{p_*} \right)^{0,4}$ . По мере увеличения

перегрузки при постоянном давлении величина скорости турбулентного горения уменьшается (рис. 1, 2), так как перегрузка повышает устойчивость нормального горения. В более широком диапазоне давлений формула (2), конечно, неприменима. Формулу

$$u = u_0 \left[ 1 + \sqrt{\frac{\rho_{ж}}{\rho_r} \left( 1 - \frac{u_*^2 p}{u_0^2 p_*} \right)} \right], \quad (3)$$

предложенную в [3] для случая больших перегрузок, проверить не удалось, поскольку диапазон изменения давлений в области турбулентного горения в опытах был невелик. Экспериментально найденные предельные давления нормального горения для нитрогликоля и метил-

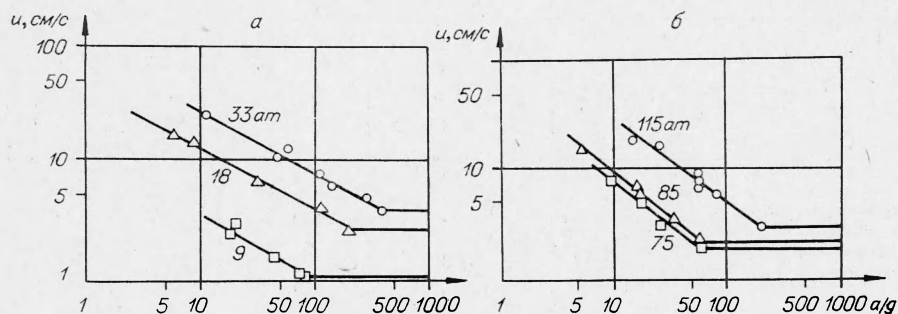


Рис. 2. Зависимость скорости горения метилнитрата (а) и нитрогликоля (б) от ускорения при различных давлениях.

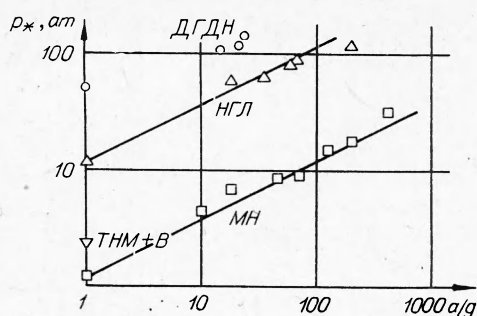


Рис. 3. Зависимость предельного давления нормального горения для метилнитрата (МН), тетранитрометана с бензолом (ТНМ+В), нитрогликоля (НГЛ) и дигликольдинитрата (ДГДН) от ускорения.

нитрата пропорциональны квадратному корню из величины ускорения (рис. 3).

#### Обсуждение результатов.

Экспериментально доказано стабилизирующее влияние ускорений на горении жидких ВВ. Как и следует из теории Л. Д. Ландау, для веществ с линейной зависимостью нормальной скорости горения от давления измеренная величина предельного давления  $p_*$  оказалась пропорциональна квадратному корню из величины ускорения (см. рис. 3). Согласно критерию Л. Д. Ландау,

при давлении, превышающем критическое (в обычном в физике смысле, когда поверхностное натяжение обращается в нуль), нормальное горение должно стать неустойчивым. Критическое давление органических жидкостей обычно лежит в пределах 40—50 атм (табл. 3). Однако, как показывает опыт, возможно нормальное горение жидких ВВ и при давлениях, превышающих критическое. Можно ожидать, что при отсутствии поверхностного натяжения стабилизировать горение могут другие факторы. Учет стабилизирующего влияния вязкости привел к следующему критерию устойчивости горения [4]:

$$l^3 < 3 \sqrt{3} g \eta \rho_{ж}^{1,2} \rho_{г}^{3,2}, \quad (4)$$

где  $\eta$  — коэффициент вязкости. Однако для исследованных ВВ стабилизация горения вязкостью не может быть основным стабилизирующим фактором, так как для этих веществ коэффициент вязкости мал ( $\eta \approx 10^{-2}$  пз). Расчет по формуле (4) показывает, что стабилизация горения вязкостью недостаточна. Этот вывод дополнительно подтверждается тем, что опыт дал зависимость  $p_* \sim \sqrt{a}$ , а формула (4) предсказывает зависимость  $p_* \sim a^{2/3}$  для веществ с линейной зависимостью скорости горения от давления.

В работе [5] выдвинуто предположение, что при отсутствии поверхностного натяжения горение жидких ВВ стабилизируется из-за зависимости локальной скорости горения от кривизны поверхности, как это имеет место при горении газовых смесей. Учет стабилизирующего

Таблица 3

#### Физико-химические характеристики жидких ВВ

Вещество	Молекулярный вес	Плотность, г/см <sup>3</sup> *	Коефф. по-верхн. на-тяж., дин/см	Вязкость, с·пз**	Парафор. (расчет)	Температура кипения, °С**	Критическая температура, °С (расчет)	Критическое давление, ат	Плотность критическая, г/см <sup>3</sup>
Метилнитрат . . .	66,5	1,21	30,3	0,49	149,1	66,5	236	57,5	0,40
Нитрогликоль . . .	152,07	1,49	45,4	4,21	264,0	200	373	38,6	0,38
Дигликольдинитрат	196,07	1,39	44	8,08	364,0	212	386	27	0,38
Этилнитрат . . .	91,04	1,11	23,2	0,523	189,1	89	258	46,2	—

\*  $t=20^\circ \text{C}$ .

\*\*  $p=1$  ат.

влияния этого фактора приводит к следующему критерию устойчивости горения:

$$I^3 < 8\mu\kappa g\rho_{ж}^2\rho_{г},$$

где  $\mu$  — коэффициент в выражении  $u = u_0\left(1 + \mu \frac{\kappa}{uR}\right)$ ;  $\kappa$  — коэффициент теплопроводности;  $R$  — радиус кривизны поверхности горения.

Критерий (5) при  $u = Br$  приводит к зависимости  $p_* \sim \sqrt{u}$ , что и наблюдается экспериментально. Сравнение критерия (5) с опытными результатами показывает, что  $\mu \approx 50$ , а для газовых смесей  $\mu \sim 1$ . Возможна ли такая большая величина в случае горения жидкостей — нужно проверить теоретически. По предположению авторов работы [5], к такой большой величине  $\mu$  может привести большой тепловой поток, отводящийся в жидкость.

Дополнительно остановимся на рассмотрении устойчивости горения жидких ВВ, у которых существенную роль имеют реакции в жидкой фазе вблизи поверхности горения. В этом случае температура горячей поверхности может быть ниже температуры кипения, и поэтому при давлении даже выше критического может сохраняться граница между жидкой и газовой фазами. Другими словами, к этому случаю можно применить теорию Ландау. Такая картина сохраняется до тех пор, пока температура поверхности не достигнет критической величины. Не исключено, что в нашем случае  $T_{кр}$  не достигается в измеренном диапазоне давлений, так как для данных ВВ она довольно высока. Неравенство температуры поверхности горения жидкости температуре кипения отмечено в работе [6] для этилнитрата при давлении выше 14 ат.

Поступила в редакцию  
31/1 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Д. Ландау. ЖЭТФ, 1944, 14, 240.
2. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., «Наука», 1966.
3. А. Д. Марголин. Докт. дисс. М., 1968.
4. В. Г. Левич. Докл. АН СССР, 1956, 109, 975.
5. А. Д. Марголин. В сб. «Горение и взрыв». М., «Наука», 1972.
6. D. L. Hildenbrand, A. G. Whittaker. J. Phys. Chem., 1955, 59, 10.

УДК 536.46

### СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ 6,5,4 И 3-АМИНОВ НИТРАТА КОБАЛЬТА (III)

В. В. Горбунов, А. А. Шидловский, Л. Ф. Шмагин

(Москва)

В работе Преллера [1] исследованы взрывчатые свойства и чувствительность аминоккомплекса  $Co(NH_3)_6(NO_3)_3$ . Позднее была показана способность этого соединения к горению в условиях возрастающего [2] и постоянного [3] давления. Представляло интерес исследовать горение соединений, близких по химическому составу:  $Co(NH_3)_n(NO_3)_3$ , где  $n=6, 5, 4$  или  $3$ , и сопоставить полученные результаты с термохимическими характеристиками этих соединений. Ранее [3] было показано, что скорость горения нитратов аминов меди (II) и никеля (II) зависит от соотношения  $NH_3/NO_3^-$  в молекуле соли и увеличивается при повышении температуры горения.