

7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. Механика сплошных сред. Гостехиздат, 1953.
8. Илюхин В. С., Похил П. Ф., Розанов О. К. и Шведова Н. С. Измерение ударных адиабат литого тротила, кристаллического гексогена и нитрометана. Докл. АН СССР, 1960, т. 131, № 4.
9. Дремин А. Н. и Похил П. Ф. Параметры детонационной волны тротила, гексогена, нитроглицерина и нитрометана. Докл. АН СССР, 1959, т. 128, № 5.
10. Дремин А. Н. и Похил П. Ф. Ширина зоны химической реакции детонационной волны тротила. Докл. АН СССР, 1959, т. 127, № 6.
11. G a r n W. V. Determination of the unreacted Hugoniot for liquid TNT. 1959, vol. 30, No 3.
12. G a r n W. V. Detonation pressure of liquid TNT, J. Chem. Phys., 1960, vol. 32, No 3.
13. C h a i k e n R. F. Comments on hypervelocity wave phenomena in Condensed explosives. J. Chem. Phys., 1960, vol. 33, No 3.
14. Зельдович Я. Б. К теории распространения детонации в газообразных системах. Ж. эксперим. и теор. физ., 1940, т. 10, вып. 5.
15. Харитон Ю. Б. О детонационной способности взрывчатых веществ. Сб. Вопросы теории взрывчатых веществ. Изд. АН СССР, 1947.
16. Беляев А. Ф. и Курбангалина Р. Х. Влияние начальной температуры на величину критического диаметра нитроглицерина и тротила. Ж. физ. химии, 1960, т. 34, вып. 3.

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ ОТ ПЛОТНОСТИ

Н. Н. Бахман, А. Ф. Беляев, Г. В. Лукашеня, Д. П. Поликарпов
(Москва)

Скорость горения (u см/сек) конденсированных систем может зависеть от относительной плотности образца $\delta = \rho/\rho_{\max}$, где ρ г/см³ — реальная, ρ_{\max} — максимально возможная плотность данного образца. Вид кривой $u(\delta)$ зависит от условий протекания реакции и наличия теплопотерь. Перечислим некоторые частные случаи:

1) если реакция протекает в газовой фазе и отсутствуют теплопотери, массовая скорость горения $u\delta = \text{const} \neq f(\delta)$,

2) в тех же условиях, но при наличии теплопотерь, $u\delta$ падает по мере уменьшения δ ;

3) если реакция протекает в конденсированной фазе, причем значение δ не меняется в волне прогрева перед зоной реакции, то при отсутствии теплопотерь $u\delta \sim \sqrt{\lambda\delta^n}$, где λ кал/см·сек·град — коэффициент теплопроводности, n — порядок реакции. В частности, при $n = 1$ и $\lambda \sim \delta$ получим $u\delta \sim \delta$;

4) наличие теплопотерь (в условиях пункта 3) усиливает падение $u\delta$ по мере уменьшения δ ;

5) если реакция протекает в расплаве при $\delta = 1$, то имеют место положения, указанные в пунктах 1, 2.

Все сказанное в пунктах 1—5 справедливо при отсутствии проникновения расплава или нагретого газа в поры свежего вещества, т. е. при отсутствии конвективной теплопередачи от зоны горения к свежему веществу. Напротив, если такое проникновение имеет место (обычно в области малых δ), произведение $u\delta$ может увеличиваться при уменьшении δ .

В данной работе была определена зависимость $u(\delta)$ для перхлората аммония (ПХА). Опыты проводились в бомбе постоянного давления в азоте. Скорость горения измерялась при помощи фоторегистра и пьезоэлектрического датчика давления. Было проведено пять серий опытов.

Первая серия опытов была проведена в инертной оболочке (цемент — фосфат, стекло) при диаметре заряда 10 мм. В этом случае при уменьшении δ снижалось не только произведение $u\delta$, но и скорость горения u (табл. 1). При этом устойчивость го-

Таблица 1
Зависимость $u(\delta)$ для ПХА (фракция 100—140 μ) в инертной оболочке

ρ , ати	u , см/сек			$u\delta$		
	$\delta = 1$	$\delta = 0.75$	$\delta = 0.65$	$\delta = 1$	$\delta = 0.75$	$\delta = 0.65$
100	1.0	0.67	0.65	1.0	0.50	0.42
60	0.66	0.46	—	0.66	0.34	—

рения ПХА при $\delta = 0.75$ и $\delta = 0.65$ была низкой, в части опытов горение временами приостанавливалось, заряд сгорал не полностью, разброс результатов был велик (точки, приведенные в табл. 1, являются средними из большого числа опытов). Отметим, что при $\delta \approx 1$ скорость горения слабо зависит от размера частиц ПХА (так,

Таблица 2
Зависимость $u(\delta)$ для ПХА в оболочке из плексигласа

$p, \text{ атм}$	$u, \text{ см/сек}$		$u\delta$	
	$\delta = 0.96$	$\delta = 0.72$	$\delta = 0.96$	$\delta = 0.72$
А. Фракция ПХА $\sim 15 \mu$				
100	1.14	1.26	1.10	0.91
40	0.49	0.59	0.47	0.425
10	0.15	0.16	0.144	0.115
5	0.068	0.10	0.065	0.072
Б. Фракция ПХА 320—410 μ				
100	1.20	проскок горения	1.15	—
40	0.54	То же	0.52	—
10	0.104	0.155	0.10	0.11
5	0.063	0.078	0.06	0.056

при $p = 100 \text{ атм}$ скорость горения $u = 1.0, 0.99$ и 1.2 см/сек соответственно для фракций 100—140, $< 100 \mu, \sim 15 \mu$.

Найденное на опыте снижение u (и тем более $u\delta$) по мере уменьшения δ может соответствовать случаям 2, 3 или 4. Случай 5 можно не рассматривать, так как ПХА при горении практически не плавится. Отметим, что в работе [1] высказано мнение, согласно которому горение ПХА протекает вблизи предела даже при высоких давлениях. Если это справедливо, то для ПХА теплопотери должны играть весьма существенную роль и могут сильно снижать u по мере уменьшения δ .

Чтобы выяснить роль теплопотерь, была проведена вторая серия опытов, в которой ПХА запрессовывался в оболочки из плексигласа (с внутренним диаметром 6 мм). В этом случае у поверхности контакта ПХА — плексиглас возникает диффузионное пламя, так что теплопотери на боковых границах заряда должны частично или полностью компенсироваться теплоприходом от диффузионного пламени. Что же касается реакции в конденсированной фазе, то ее характер не должен существенно измениться при изменении материала оболочки. Проведенные опыты показали, что в случае горения ПХА в оболочках из плексигласа скорость горения уже не уменьшается, а растет при уменьшении δ . Произведение $u\delta$ хотя и уменьшается при уменьшении δ , но значительно слабее, чем в случае ПХА в инертной оболочке (табл. 2). Иногда наблюдалось даже небольшое увеличение $u\delta$ по мере уменьшения δ , что, впрочем, следует приписать разбросу результатов. Что касается устойчивости горения, то ПХА в оболочках из плексигласа при $\delta \geq 0.7$ полностью сгорает даже при $p = 1 \text{ атм}$, в то время как горение ПХА в инертной оболочке (или без оболочки) не идет ниже 20—40 атм. Разброс результатов для ПХА в оболочках из плексигласа сравнительно невелик.

В третьей серии опытов был исследован ПХА с добавкой 2% летучего горючего (уротропина) в оболочках из плексигласа. В этом случае (табл. 3) снижение δ приводит даже к небольшому увеличению $u\delta$ (за исключением точки при 10 атм, которая выпадает). В четвертой серии опытов ПХА был катализирован добавкой 2% Si_2O (эта добавка предложена в работе [2]). При введении катализатора скорость реакции увеличивается, а ширина зоны реакции уменьшается. Это улучшает соотношение между теплоприходом и теплопотерями, так что даже в инертной оболочке (цемент — фосфат, стекло) горение вполне устойчиво при 1 атм в широком диапазоне δ .

При этом произведение $u\delta$ практически не зависит от δ :

$$\delta = 0.84 \quad 0.62 \quad 0.59 \quad 0.54 \quad 0.38$$

$$u\delta = 0.092 \quad 0.098 \quad 0.094 \quad 0.094 \quad 0.095 \text{ см/сек}$$

Примечание: Диаметр заряда 10 мм; размер частиц ПХА около 15 μ .

Таблица 3
Зависимость $u(\delta)$ для ПХА (фракция $\sim 15 \mu$) + 2% уротропина ($d < 30-40 \mu$) в оболочке из плексигласа

$p, \text{ атм}$	$u, \text{ см/сек}$		$u\delta$	
	$\delta = 0.98$	$\delta = 0.78$	$\delta = 0.98$	$\delta = 0.78$
100	0.84	1.09	0.82	0.85
40	0.38	0.52	0.37	0.41
10	0.14	0.125	0.137	0.098
5	0.098	0.126	0.096	0.098

Пятая серия опытов была проведена с чистым ПХА в инертной оболочке при повышенной начальной температуре T_0 (и $p = 20 \text{ атм}$). Увеличение T_0 приводит к увеличению скорости реакции. В то же время уменьшается теплоотвод от пламени в окружающий газ, так как температура газа возросла. Соответственно, $u\delta$ падает при уменьшении δ тем слабее, чем выше T_0 . При $T_0 = 150^\circ \text{C}$ массовая скорость горения почти не зависит от δ (ср. с табл. 1):

$T_0 = 100^\circ \text{C}$			$T_0 = 150^\circ \text{C}$		
$\delta = 0.98$	0.75	0.62	0.98	0.62	
$u\delta = 0.33$	0.29	0.25	0.44	0.42	см/сек

Результаты опытов согласуются с представлениями о том, что горение ПХА протекает в газовой фазе и весьма чувствительно к теплопотерям. Если бы ведущая реакция протекала в конденсированной фазе, то увеличение начальной температуры или добавка катализатора могла бы повысить абсолютную величину скорости горения, но не могла бы дать $u\delta = \text{const}$.

Большая чувствительность горения ПХА к теплопотерям подтверждается также опытами по горению ПХА с малыми добавками горючих. В работе [1] отмечается, что малые добавки черных частиц могут подавлять горение ПХА из-за увеличения радиационных потерь. Подобным образом можно было бы объяснить обнаруженное в данной работе снижение скорости горения ПХА при введении небольших добавок битума (табл. 4).

Однако радиационные потери — это не единственная возможная причина снижения скорости горения ПХА при введении малых добавок горючего. Снижение скорости горения может наблюдаться и в том случае, если горючее является бесцветным и летучим, но размер частиц компонентов слишком велик (для данного давления).

Таблица 5
Скорость горения смесей ПХА ($\sim 15 \mu$) + уротропин ($d < 30-40 \mu$) в оболочках из плексигласа ($\delta = 0.95-1.0$; диаметр заряда 6 мм)

$p, \text{ атм}$	$u, \text{ см/сек}$			
	% уротропина (по весу)			
	0	2	4	14.2
100	1.14	0.84	0.65	2.83
40	0.49	0.38	0.42	1.66
10	0.151	0.142	0.177	0.60
5	0.068	0.098	0.140	0.39

ПХА, а при высоких давлениях становятся «крупными» и снижают скорость горения ПХА (табл. 5). Однако при достаточно большом проценте горючего (см. последнюю колонку табл. 5) скорость горения значительно превышает скорость горения чистого ПХА во всем изученном интервале давлений.

Таблица 4

Скорость горения u см/сек бедных смесей ПХА + битум ($\delta \approx 1$) в инертной оболочке (нуль означает — не горит)

$p, \text{ атм}$	% битума (по весу)				
	без битума	2.2	2.7	3.6	5.3

А. Фракция ПХА $\sim 15 \mu$

100	1.20	0	0.75	1.17	2.19
80	1.00	0	0		
60	0.74	0	0		
40	0.52	0	0	0.52	1.01
10	не горит	0	0	0.30	0.55

Б. Фракция ПХА 100—140 μ

120			0.96		
100	1.00		0.78		1.30
80			0.71		
60	0.66		0.56		
40			0		0.71
10	0		0		0.36

ЛИТЕРАТУРА

1. Arden E. A., Powling J., Smith W. A. W. Observation on the Burning of Ammonium Perchlorate. Combustion and Flame, 1962, vol. 6, No. 1, 21.
2. Jacobs P. W. M., Kureishy A. R. T. The Effect of Additives on the Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate, 8-th Symposium (International) on Combustion, p. 672.

ОПЫТ ОБОБЩЕНИЯ ДАННЫХ О КРИТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКАХ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ В ОБЛАСТИ БОЛЬШИХ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ

Л. С. Штоколов

(Новосибирск)

На основе предельных соотношений гидродинамической теории кризисов теплообмена при кипении обобщаются экспериментальные данные для нескольких жидкостей при течениях с большими скоростями и ядре потока, недогретом до температуры насыщения.

Немногочисленные исследования критических тепловых потоков при больших скоростях течения жидкости проведены главным образом с водой, см., например, [1-5].

Опубликованные опыты с этиловым и метиловым спиртом [6, 7] проведены при больших недогревах ядра потока до температуры насыщения. В этих условиях при кипении органических жидкостей возможен так называемый «распространенный кризис», без интенсивного скачка температуры и с относительно равномерным разогревом всей поверхности теплообмена одновременно.

В связи с отличием такого процесса от нормального кризиса теплообмена при кипении основная часть опытов, приведенных в работах [6, 7], не может быть пока использована для обобщения. Ниже приводятся результаты некоторых специально проведенных опытов, а также сравнение их с данными других авторов и выводами гидродинамической теории кризисов теплообмена при кипении.

Обозначения

p — статическое давление в сечении начала кризиса,	γ'' — удельный вес сухого насыщенного пара,
p_* — критическое давление,	σ — коэффициент поверхностного натяжения,
π — приведенное давление,	μ — средняя динамическая вязкость жидкости в ядре потока в сечении начала кризиса,
Δi — энтальпия недогрева,	μ' — динамическая вязкость жидкости на линии насыщения;
r — весовая теплота испарения,	g — ускорение земного притяжения,
x — относительная энтальпия недогрева,	q_* — критическая удельная плотность теплового потока,
w — средняя линейная скорость в ядре потока жидкости в сечении начала кризиса,	q_{*0} — тоже на линии насыщения.
γ — средний удельный вес жидкости в сечении начала кризиса,	
γ' — удельный вес жидкости на линии насыщения,	

Опыты проводились с 96%-ным раствором этилового спирта в вертикальных трубах. Приведенные давления $\pi = p / p_*$ изменялись от 0.0715 до 0.858, относительная энтальпия недогрева $x = \Delta i / r$ — от 0 до -2, средняя скорость ядра потока w — от 6 до 60 м/сек.

Опыты проводились на трубках из нержавеющей стали IX18H9T с внутренним диаметром 2 или 4 мм, длиной обогреваемой части соответственно 30 и 60 мм и толщиной стенки 1 мм.

При сравнении экспериментальных данных, полученных на трубках диаметром 2 и 4 мм, при одинаковых прочих условиях, влияние диаметра на q_* не обнаружено.

Кризис кипения достигался медленным увеличением электрической нагрузки на экспериментальном участке и при обычном кризисном процессе всегда начинался непосредственно около выхода из обогреваемой трубки