

$(\varepsilon + \omega)/\omega_0 = \text{const}$ соответственно. Цифры у указанных кривых дают значения этих констант. При $p_1 \rightarrow 0$ кривые приближаются к предельной гиперболе, совпадающей с предельной гиперболой для «линейного» генератора: $N = \eta / (2 \cdot |p_3|)$. Особенности работы генератора, вытекающие из рис. 1, подробно обсуждались в [1] на примере «линейного» генератора.

Из закона сохранения энергии

$$(\varepsilon + \omega)/\omega_0 = 1 + (\eta/2 \cdot |p_3|) (1 - 1/N)$$

следует, что при одинаковых параметрах η , p_3 , N значения полной энергии (т. е. $(\varepsilon + \omega)/\omega_0$) будут одинаковыми для всех трех режимов работы генератора. При $N \geq 10$ и одинаковых значениях $\eta/|p_3|$ равенство полных энергий сохраняется независимо от значений p_1 и N .

Зависимости энергий при $p_1 = 0,25$; $p_3 = -0,01$ для трех режимов работы показаны на рис. 2. На рис. 3 для режимов а), б) приведены энергии при одинаковых N , η ($\eta = 1$; $N = 100$ для кривых 1, $N = 50$ для кривых 2).

Сравнение зависимости $p_3 = p_3(N)$, построенной при учете распределенного сопротивления электродов $R_1(t)$ «линейного» генератора с данными для случая $R_2 = \text{const} \gg R_1(t)$, приведено на рис. 4. Значения p_1 для кривых: 2 — $p_1 = 0,05$; 6 — $p_1 = 0,25$; 3' — $p_1(x=0) = 0,1$; $p_1(x=1) = 0,05$; 6' — $p_1(x=0) = 0,25$; $p_1(x=1) = 0,05$.

Кривые 3', 6' с одинаковым конечным значением $p_1(x=1) = 0,05$ близки к кривой 2, и величины энергий определяются в основном сопротивлением нагрузки.

Авторы признательны В. М. Титову за обсуждение результатов.

*Институт гидродинамики СО АН СССР,
Новосибирск*

*Поступила в редакцию
16/VII 1976*

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Буренин, Г. А. Швецов. ФГВ, 1975, 11, 3.
2. В. А. Кириллин, В. А. Альтов и др. Докл. АН СССР, 1969, 185, 316.
3. М. Джонс, Ч. Мак-Киннон, В. Блэкмен.— В сб.: Прикладная магнитная гидродинамика, М., «Мир», 1965.
4. M. W. Bingham, S. J. Marshall. Proc. conference on megagauss magnetic field generation by explosives and related experiments. Frascati, Italy, 1965, Brussels, Eur. Atom, 1966, p. 367—386.

О СВЯЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАМЕНИ И СОСТАВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ БАЛЛИСТИЧНЫХ ПОРОХОВ

*Е. Л. Давидчук, В. М. Мальцев, А. Д. Марголин,
Ю. М. Петров, О. Б. Рябиков*

В настоящее время при расчете состава и температуры продуктов горения порохов на основе нитроглицерина и нитроклетчатки считают, что все реакции в пламенах порохов протекают с большой скоростью, а состав продуктов горения равновесный. Такие расчеты согласуются с экспериментальными результатами для горения порохов при высоких давлениях.

Однако в интервале давлений 1—30 атм состав продуктов сгорания и температура пламени порохов сильно отличается от равновесных [1]. Результаты экспериментов [2, 3] показывают, что при низких давлениях, когда наблюдается кинетическая неполнота сгорания, содержание окиси азота в продуктах сгорания значительно (на несколько порядков величины) превосходит равновесное, причем с увеличением давления от 5 до 20 атм объемная доля NO в продуктах горения пороха Н падает с 19,5 до 9%, а пироксилинового пороха — с 23,0 до 13,5%, в то время как равновесное количество NO значительно меньше 1%. В продуктах горения баллиститных порохов при давлениях 1—30 атм обнаружено также незначительное количество двуокиси азота [3].

Рассматривая экспериментальные данные, можно видеть определенную связь между температурой пламени и количеством NO в продуктах сгорания баллиститных порохов. Известно, что окисление исходных и промежуточных продуктов сгорания окисью азота происходит значительно медленнее, чем окисление другими окислами азота (NO₂, N₂O). Состав продуктов сгорания пороха в области кинетической неполноты сгорания определяется кинетикой химических реакций, давлением, размером образца и условиями его сжигания. Кинетика горения весьма сложна и мало изучена.

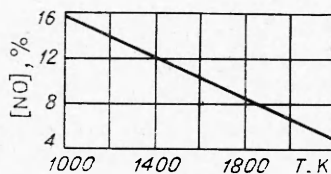
В данной работе сделано предположение, что расходование NO — самый медленный химический процесс в пламени при горении пороха. На основании этого предложена следующая модель образования продуктов горения баллиститных порохов: принимается, что все продукты горения находятся в термическом равновесии, а химическое равновесие установлено между всеми продуктами горения, за исключением окиси азота. В соответствии с этой моделью был рассчитан состав продуктов горения пороха Н и пироксилинового пороха (12% N) при давлениях 5, 10, 20 атм.

Расчет проводился в следующей последовательности: на основе заданного определенного количества NO из исходного состава топлива формально вычиталось соответствующее количество атомов N и O. Для полученного таким образом условного топлива на ЭВМ рассчитывались энтальпия и термодинамически равновесный состав продуктов сгорания при различных температурах [4]. Температура сгорания находилась из условия равенства энтальпии образования исходного топлива и энтальпии продуктов сгорания, включая NO (сумма энтальпий продуктов условного топлива плюс энтальпия NO). Повторяя эту операцию для различного количества NO, можно получить зависимость мольной доли NO в продуктах сгорания топлива от адиабатической температуры пламени. Эта расчетная зависимость для пороха Н приведена на рисунке.

Из рассмотрения полученного расчетного состава продуктов горения баллиститных порохов видно, что продукты горения состоят практически только из NO, CO, CO₂, H₂, H₂O. Таким образом, в первом приближении для расчета состава продуктов горения (кроме NO) баллиститных порохов достаточно использовать только константу равновесия реакции «водяного газа».

В табл. 1, 2 приведены результаты расчетов и измерений состава продуктов горения пироксилинового (12% N) и нитроглицеринового порохов при давлениях 5, 10, 20 атм, причем расчет велся как на ЭВМ с учетом всех возможных продуктов сгорания, так и аналитически с учетом только реакции водяного газа. Температуры пламен измерены яркостным оптическим способом [1].

Из табл. 1, 2 видно, что аналитический



Состав продуктов сгорания нитроглицеринового

p, атм	T _{max} , К [1]	NO				N ₂		
		измерения		расчет		измерения [3]	расчет	
		[3]	настоящей работы	А	Б		А	Б
5	1690	19,5	12,7	9,7	9,6	6,3	8,5	8,6
10	1850	13,0	8,3	7,9	7,9	8,0	9,6	9,6
20	2000	9,0	6,4	6,2	6,2	11,2	10,9	10,9

Пр и м е ч а н и е. Измеренные в [3] величины получены для образцов диаметром 9 мм. А —

Состав продуктов сгорания пироксилинового

p, атм	T _{max} , К [1]	NO				N ₂			CO ₂		
		измерения		расчет		измерения [3]	расчет		измерения [3]	расчет	
		[3]	настоящей работы	А	Б		А	Б		А	Б
5	1780	23	9,7	7,0	7,1	7,0	8,2	8,1	16,0	11,0	11,0
10	1900	19,9	7,8	5,8	5,8	8,2	9,1	9,1	14,9	11,1	11,2
20	2075	13,5	5,6	3,8	3,8	10,0	10,6	10,6	15,1	12,2	12,2

Пр и м е ч а н и е. Измеренные в [3] величины получены для образцов диаметром 5 мм.

расчет и на ЭВМ дают практически совпадающие результаты. Наблюдающееся различие между расчетным и измеренным [2, 3] составом продуктов горения определяется, видимо, условиями закалки продуктов. Расхождение между расчетом и экспериментом по концентрации водорода представляет интерес для дальнейших исследований. Отметим также, что в [2, 3] показано, что с увеличением диаметра сжигаемого образца пороха (с 5 до 9 мм) при постоянном давлении (10—20 атм) количество NO в продуктах горения уменьшается (приблизительно в 2 раза).

Результаты измерений, полученные в данной работе методом абсорбционной спектроскопии, ближе к расчетным, чем результаты химического анализа [2, 3].

В работе [2] исследован состав продуктов сгорания пороха Н в вакууме и обнаружено значительное количество двуокиси азота (до 4%). Вычисление состава продуктов горения по изложенной модели для измеренных [5] температур пламени дает сильное расхождение с экспериментом [2]. Таким образом, описанная модель образования продуктов сгорания баллиститных порохов пригодна при отсутствии в продуктах двуокиси азота, т. е. в диапазоне давлений от 1 до ~60 атм. Используя полученную зависимость $T = \varphi[\text{NO}]$, можно по известной температуре сгорания вычислить состав основных продуктов сгорания.

Описанная модель применима к расчетам продуктов горения не только баллиститных порохов (нитроглицериновых и пироксилиновых), но и других нитрозфиров. Предложенный метод позволяет получать предварительную информацию о составе конечных продуктов сгорания и о распределении продуктов сгорания в зоне догорания (в пламени) при температурах выше 1100—1500 К, когда двуокись азота уже израсходована.

Институт химической физики АН СССР, Москва

Поступила в редакцию
30/X 1975

Таблица 1

пороха Н (объемная доля, %)

CO ₂			CO			H ₂			CH ₄ измере- ния
измерения [3]	расчет		измерения [3]	расчет		измерения [3]	расчет		
	А	Б		А	Б		А	Б	
17,4	7,5	7,6	47,8	51,0	51,1	6,1	23,3	23,2	2,9
18,0	8,6	8,5	49,0	51,3	51,3	10,0	22,6	22,6	2,1
17,6	8,9	8,9	50,0	52,8	52,7	11,2	21,5	21,5	1,0

расчет ЭВМ; Б — аналитический расчет.

Таблица 2

пороха (12% N) (объемная доля, %)

CO			H ₂			CH ₄ измерения [3]	H ₂ O		
измерения [3]	расчет		измерения [3]	расчет			измерения [3]	расчет	
	А	Б		А	Б	А		Б	
44,5	51,6	51,5	5	22,2	22,2	4,0	10,8	11,8	11,8
46,8	53,0	53,0	6,9	20,9	20,9	3,8	—	13,0	13,1
46,9	53,8	53,8	11,5	19,8	19,8	3,0	14,5	14,2	14,2

[H₂O] — массовая доля, %; А — расчет ЭВМ; Б — аналитический расчет.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Мальцев. Канд. дис., ИХФ АН СССР, 1961.
2. П. Ф. Похил. Докт. дис., ИХФ АН СССР, 1954.
3. Л. Д. Ромоданова. Канд. дис., ИХФ АН СССР, 1955.
4. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Т. I. М., ВИНТИ, 1971.
5. А. А. Зенин. ФГВ, 1966, 2, 1.

К АНАЛИЗУ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГАЗА ПРИ ГОРЕНИИ В ТРУБАХ

В. А. Скляр, В. И. Фурлетов

Исследование частотных характеристик ламинарного пламени, выполненное в работе [1], позволяет указать пределы применимости результатов, полученных в [2]. В работе [2] была сделана теоретическая оценка возможности самовозбуждения продольных колебаний газа плоским пламенем в акустически закрытой с обоих концов трубе. Анализу была подвергнута одна из возможных причин самовозбуждения колебаний — зависимость нормальной скорости пламени u от термодинамических параметров газа. В соответствии с этим u предполагалась известной функцией давления p_1 и температуры T_1 горючей смеси $u = u(p_1, T_1)$.