

## Детонация рабочих веществ СНО химического состава лазерного реактивного двигателя

© А.А. Агейчик, Е.В. Репина, Ю.А. Резунков, А.Л. Сафронов

Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем (НИИКИ ОЭП),  
188540 Сосновый Бор, Ленинградская область, Россия  
e-mail: yuri@sbor.net

(Поступило в Редакцию 19 ноября 2007 г.)

Теоретически и экспериментально исследована лазерная абляция веществ, к которым относятся полимеры и поликристаллические вещества многочисленной группы СНО химического состава. На основании анализа полученных экспериментальных данных предложена параметрическая физико-химическая модель детонации указанных веществ для оценки эффективности формирования лазерной тяги в лазерных реактивных двигателях.

PACS: 52.38.Mf

### Введение

Особенностью лазерной тяги [1] является то, что механизмы, ответственные за ее формирование, „включаются“ в результате воздействия внешнего (т.е. расположенного на расстоянии) источника лазерной энергии. К таким механизмам относятся:

- лазерная абляция,
- вынос рабочей массы газа лазерной детонационной волной (или ударной волной),
- высвобождение энергии химических связей молекул рабочего вещества, которое само по себе является химически нейтральным.

В настоящей работе рассматриваются процессы лазерной детонации веществ СНО химического состава для достижения максимальной эффективности формирования тяги в лазерном реактивном двигателе (ЛРД).

Одни из первых экспериментальных исследований в этом направлении были проведены в [2] с использованием излучения  $\text{CO}_2$ -лазера. В экспериментах использовался материал Славит, особенностью которого является низкий порог абляции (испарения) под воздействием лазерного импульса. Позднее аналогичные эксперименты были проведены в [3], в которых использовался полимер Delrin (полиоксиметилен).

Однако авторы указанных статей не указывают, какие именно физико-химические процессы привели к значительному увеличению эффективности формирования лазерной тяги, наблюдаемому в экспериментах. Из описания в [12] также сложно понять, к какому классу веществ можно отнести материал Славит и оценить перспективность его использования в качестве рабочего вещества ЛРД.

По результатам этих и других [4–6] исследований можно отметить ряд особенностей, связанных с формированием лазерной тяги с применением дополнительно рабочего вещества.

1. Использование в ЛРД рабочих СНО-веществ значительно увеличивает эффективность формирования тяги.

Под действием лазерного импульса в испаренном материале инициируются химические реакции, протекающие со значительным выделением энергии, что приводит к увеличению удельного импульса реактивной отдачи двигателя  $C_m$ .

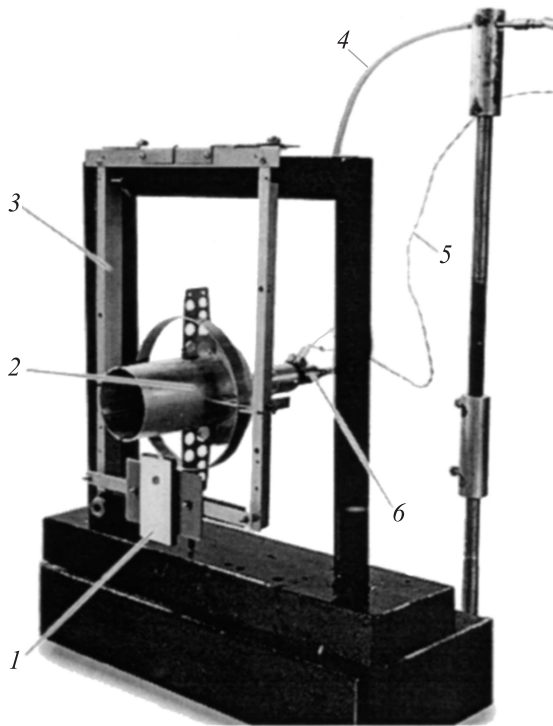
2. Процесс взаимодействия лазерного импульса с СНО-веществом существенно зависит от его агрегатного состояния (твердое или жидкое), химического состава, термодинамических свойств, способа подачи его в сопло двигателя, способа фокусировки лазерного пучка, характеристик лазерного пучка и т.д.

Для определения влияния энергетических характеристик вещества на характеристики тяги ЛРД нами был рассмотрен ряд полимерных и поликристаллических веществ СНО-состава с отрицательным кислородным балансом, для которых были рассчитаны основные термодинамические параметры: удельная теплота сгорания, детонации и догорания продуктов детонации, коэффициенты  $N$  догорания продуктов детонации и эффективности  $K$  использования твердого топлива в ЛРД. На основе результатов экспериментов по лазерной детонации указанных веществ и их анализа предложена физическая модель детонации СНО-веществ и формирования тяги в ЛРД.

### Постановка экспериментальных исследований процессов лазерной детонации веществ СНО химического состава

Для проведения экспериментальных исследований по влиянию характеристик СНО-веществ на формирование лазерной тяги использовалась специальная модель двигателя (рис. 1), в конструкции которой можно было использовать как твердые, так и жидкие рабочие вещества.

Концентратор излучения модели двигателя образован конической поверхностью с прямолинейной образующей и с полным углом при вершине, равным  $80^\circ$ . Световой диаметр конуса — 60 mm, толщина стенок —



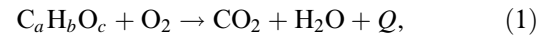
**Рис. 1.** Модель ЛРД для испытания рабочих веществ СНО химического состава, установленная на маятнике: 1 — зеркало, 2 — модель ЛРД, 3 — маятник, 4 — топливная трубка, 5 — электропитание, 6 — форсунка.

1 mm. Соплом является цилиндр диаметром 60 mm и длиной 100 mm. В вершине конуса имелось отверстие с резьбой для крепления твердого рабочего вещества или форсунки для импульсной подачи жидкого рабочего вещества. Используемая в экспериментах установка позволяла впрыскивать вещество в жидкой фазе в область фокусировки лазерного пучка. Для импульсной подачи жидкости в виде мелких капель (диаметром  $\sim 100 \mu\text{m}$ ) был применен инжектор от автомобильного двигателя марки BOSCH.

По визуальным наблюдениям эффективный диаметр жидкой струи в области фокусировки не превышал 1 см, при этом длительность работы форсунки при импульсном впрыскивании жидкого вещества составляла 6 ms, а соответствующая задержка лазерного импульса — 5 ms. Твердые рабочие вещества в виде цилиндра диаметром 6 mm вставлялись в область фокусировки лазерного пучка. В экспериментах использовался импульсный ЭИ  $\text{CO}_2$ -лазер с энергией в импульсе до 100 J [7]. Для определения  $C_m$  применялся баллистический маятник, на котором подвешивалась модель двигателя [8].

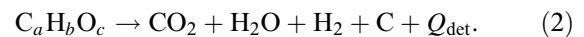
Для постановки экспериментальных исследований и анализа полученных данных использовалась физико-химическая модель процесса детонации СНО-веществ, инициированного лазерным импульсом. В качестве исходных данных в модели были выбраны энергетические характеристики этих веществ.

Известно [9], что лазерное излучение индуцирует испарение и термическое разложение СНО-вещества — пиролиз, который начинается уже при температуре 500–700°C в отсутствие кислорода воздуха. Реакция высокотемпературного окисления (сгорания) продуктов пиролиза СНО-вещества в кислороде воздуха происходит по следующей упрощенной схеме:



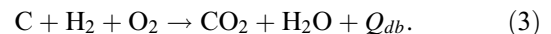
где  $Q$  — удельная теплота сгорания, которая выделяется при протекании двух последовательных процессов.

Первый из них, который и инициируется лазерным импульсом, есть реакция детонации (detonation). Под детонацией понимается распространение в пространстве процесса химического окисления горючих компонентов веществ кислородом, входящим в его состав, со скоростью, превышающей скорость звука. При этом выделяется энергия детонации  $Q_{\text{det}}$ :



Такой тип химической реакции приводит к возникновению мощной детонационной волны и реализуется, например, в двигателях на взрывном топливе. Для вычисления энергии, выделяемой реакцией детонации в условиях Чепмена–Жуге, в [10] предложена единая для всех типов взрывчатых веществ термодинамически обоснованная последовательность образования продуктов детонации. Применяв ее для веществ СНО химического состава, получим следующую последовательность:  $\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O--O}_2\text{--H}_2$ . По принятому допущению продуктами детонации могут быть  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , но не  $\text{CO}$ , причем образование  $\text{CO}_2$  превалирует над  $\text{H}_2\text{O}$ .

Второй процесс — реакция догорания (delayed burning) не полностью окисленных продуктов детонации вещества в кислороде воздуха, при которой выделяется энергия догорания  $Q_{\text{db}}$ . Такой тип химической реакции реализуется, например, в воздушно-реактивном двигателе на углерод-водородном топливе:



Учитывая принятые допущения, теплоту реакций детонации и догорания можно рассчитать по закону Гесса:

$$Q_{\text{det}} = -(\Delta H_{\text{pr}} - \Delta H_{f298}^0); \quad (4)$$

$$Q_{\text{db}} = -\Delta H_{\text{pr}}, \quad (5)$$

где  $\Delta H_{\text{pr}}$  — энтальпия образования продуктов (products) реакции;  $\Delta H_{f298}^0$  — энтальпия образования вещества.

Энергетический баланс при лазерном пробое (включая процесс детонации) паров СНО-вещества и сгорания его компонентов в кислороде воздуха представим в виде:

$$(M + m)v^2/2 = \beta[\alpha E + mQ], \quad (6)$$

где  $m$  — масса испаренного вещества,  $M$  — масса воздуха в объеме сопла двигателя,  $Q$  — теплота сгорания вещества:  $Q = Q_{\text{det}} + NQ_{\text{db}}$ ,  $N$  — коэффициент догорания

или доля массы испаренного вещества, догорающая в кислороде воздуха (эта величина зависит от химического состава вещества и концентрации кислорода в сопле двигателя),  $v$  — средняя скорость истечения продуктов сгорания,  $\alpha$  — коэффициент преобразования энергии лазерного излучения в тепловую энергию вещества,  $\beta$  — коэффициент преобразования тепловой энергии в энергию выхлопной струи. Близкими к реальным считаются значения  $\alpha = 0.4$ ,  $\beta = 0.9$  [11].

В соответствии с общим определением удельного импульса реактивной отдачи  $C_m$  [12] приведенные формулы позволяют определить его изменение при использовании в ЛРД рабочего СНО-вещества:

$$C_{m1} = J/E = Mv/E = \sqrt{2M\beta\alpha/E}, \quad (7)$$

$$C_{m2} = J/E = (M + m)v/E = \sqrt{2(M + m)\beta[\alpha E + mQ]/E^2}, \quad (8)$$

где  $C_{m1}$  — удельный импульс реактивной отдачи ЛРД,  $C_{m2}$  — удельный импульс реактивной отдачи ЛРД с рабочим веществом СНО-состава. Отсюда относительное изменение (коэффициент увеличения  $K$ ) удельного импульса реактивной отдачи в ЛРД при использовании дополнительного рабочего вещества может быть определено как

$$K = C_{m2}/C_{m1} = \sqrt{(1 + m/M)(1 + mQ/\alpha E)}. \quad (9)$$

При анализе импульса реактивной отдачи в ЛРД с использованием твердых веществ можно воспользоваться параметром  $Q^* = E/m$  [13], при введении которого в формулу коэффициента  $K$  увеличения  $C_m$  (9), имеем

$$K = C_{m2}/C_{m1} = \sqrt{(1 + m/M)(1 + Q/\alpha Q^*)}. \quad (10)$$

Учитывая, что  $Q = Q_{det} + NQ_{db}$ , при  $\alpha = 0.4$  эффективность использования твердого вещества в ЛРД определяется соотношением

$$K \approx [1 + 2.5(Q_{det}/Q^* + NQ_{db}/Q^*)]^{1/2}.$$

Следует отметить, что при расчете коэффициента  $K$  учитываются значения  $N < 1$ , при  $N \geq 1$  происходит полное догорание продуктов детонации.

Введенный, таким образом, коэффициент увеличения удельного импульса реактивной отдачи  $K$  позволяет оценить влияние плазмохимических процессов при лазерной абляции СНО-веществ на эффективность формирования тяги в ЛРД по сравнению с аналогичным воздушно-реактивным вариантом.

### Особенности экспериментальных исследований различных рабочих веществ СНО химического состава для ЛРД

В качестве полимерных рабочих веществ были исследованы полиоксиметилен (polyoxymethylene) (Delrin)

$[-CH_2O-]_n$ , поливинилхлорид (polyvinylchloride)  $[-CH_2CHCl-]_n$  (выбор поливинилхлорида был обусловлен тем, что в [14] он показал самый высокий результат по эффективности применения в качестве рабочего вещества в ЛРД), полистирол (polystyrene)  $[-C_8H_8-]_n$  и поликарбонат (polycarbonate)  $[-C_{16}H_{14}O_3-]_n$ . Первые два вещества относятся к линейным алифатическим полимерам, термическое разложение (разрыв цепи) которых происходит при невысоких температурах ( $\sim 200^\circ C$ ), таким образом, они имеют достаточно высокую химическую активность и относятся к низкотемпературным конструкционным материалам [9,15]. Два следующих полимера в своем составе содержат бензольные кольца, которые обладают свойством поглощать энергию лазерного излучения, перераспределяя ее по связям бензольного кольца и повышая температуру разложения полимера ( $\sim 350^\circ C$ ). Полимеры с ароматической главной цепью (поликарбонат, эпоксидные смолы) относятся ко второму поколению высокотемпературных конструкционных материалов с низкой химической активностью [15].

Всем светопрозрачным полимерам при отсутствии примесей присущи собственные области поглощения, обусловленные колебаниями основных структурных групп, т.е. внутримолекулярных колебаний, при которых изменяется относительное взаиморасположение ядер атомов (валентные колебания) и валентных углов между связями (деформационные колебания), а также поглощение обертонов высокочастотных колебаний связей C—H [9].

Наибольшей интенсивностью в области частоты излучения CO<sub>2</sub>-лазера ( $943\text{ cm}^{-1}$ ) обладают полосы поглощения валентных колебаний S—F, Si—F, B—Cl, C—F, C—N, C—C. Симметричные и асимметричные C—O—C валентные колебания в алифатических полимерах также имеют ярко выраженные полосы поглощения ( $943\text{--}833\text{ cm}^{-1}$ ). Кроме того, здесь проявляются внеплоскостные деформационные колебания C—H алканов и O—H группы [9].

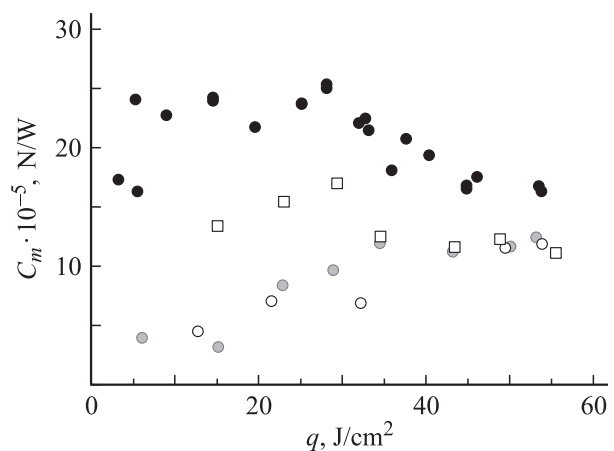


Рис. 2. Зависимость  $C_m$  для полиоксиметилена (●), полистирола (●), поликарбоната (□) и поливинилхлорида (○) от плотности потока лазерной энергии  $q$ .

Таблица 1. Результаты расчета коэффициентов догорания  $N$  и эффективности  $K$  использования полимерного рабочего вещества

Вещество	$\mu$	$Q_{det}, \frac{kJ}{kg}$	$Q_{db}, \frac{kJ}{kg}$	$m_{av} \cdot 10^{-6}, kg$	$E_{av}, J$	$Q_{det}/Q^*$	$Q_{db}/Q^*$	$K$	$N$	$C_{m,max} \cdot 10^{-5}, N/W$
Polycarbonate**	254.3	661	29 115	2.83	66.56	0.03	1.24	2.04	2.23	12.5
Polystyrene	104.2	0	40 954	1.25	62.48	0	0.82	1.75	3.37	13
Polyvinylchloride	62.5	0	17 857	4.11	50.64	0	1.45	2.15	1.90	18
Polyoxymethylene	30.03	2692	14 615	12.33	61.01	0.54	2.95	3.12	1.	27

Примечание: \*\* — расчет  $\Delta H_{f,298}^0$  поликарбоната проводился с использованием метода Франклина [16], av — average (средний).

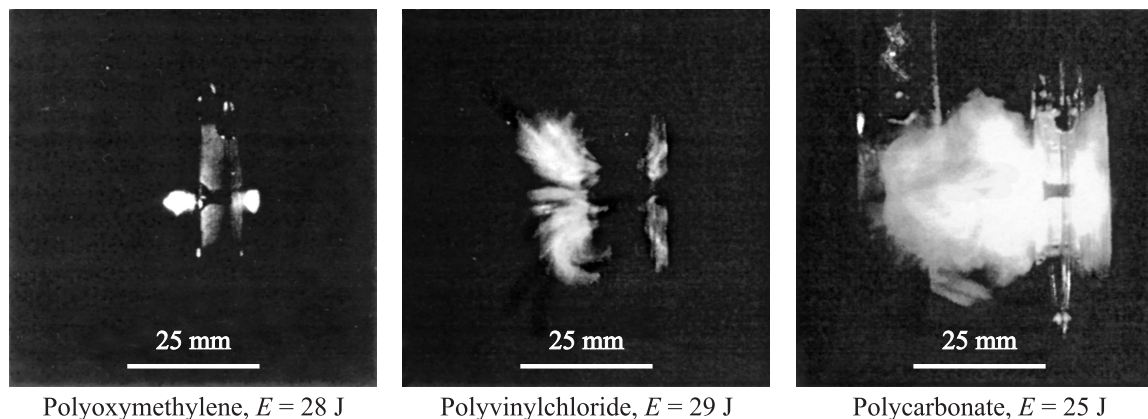


Рис. 3. Фотографии плазменных факелов у поверхности полимерных образцов.

Для расчета коэффициента  $K$  эффективности использования полимерного рабочего вещества в ЛРД, связанного с процессами детонации и догорания продуктов детонации, были рассчитаны сравнительные коэффициенты  $N$  догорания полимерных веществ в кислороде воздуха. Расчет коэффициентов догорания  $N$ , а также энергетических составляющих параметра  $K$  производился с использованием результатов проведенных экспериментов и рассчитанных теплоты детонации и теплоты догорания продуктов детонации исследуемых полимеров (табл. 1).

На рис. 2 представлена зависимость  $C_m$  исследуемых полимеров от плотности энергии лазерного пучка, полученная экспериментально. Из рисунка видно, что значение  $C_m$  для полиоксиметилена и поливинилхлорида при плотности энергии 20–25 и 30 J/cm<sup>2</sup> соответственно достигает максимума и затем начинает снижаться при увеличении плотности энергии. Для полистирола максимальное значение  $C_m$  достигается при плотности лазерной энергии 30–35 J/cm<sup>2</sup>, а для поликарбоната — при 45–50 J/cm<sup>2</sup>.

На рис. 3 представлены фотографии испытаний полимеров при небольшой энергии излучения, сделанные фотоаппаратом с использованием одного и того же нейтрального фильтра. Видно, что характер свечения плазмы оптического пробоя для различных веществ различен. Для полиоксиметилена плотность энергии лазерного импульса на испытуемом образце соответствует порогу пробоя, когда область свечения плазмы почти не экранирует падающий пучок. Для поливинилхлорида это уже достаточно большая область свечения. Для

поликарбоната — большое яркое плазмообразование. Величина удельного импульса реактивной отдачи для этих примеров составляет соответственно  $24 \cdot 10^{-5}$ ,  $14 \cdot 10^{-5}$  и  $5 \cdot 10^{-5}$  N/W.

Предварительный информационный поиск и термодинамические расчеты реакций сгорания среди многочисленной группы СНО кристаллических веществ позволит выявить несколько поликристаллических веществ, обладающих следующими свойствами: высокая дисперсность, относительная химическая стабильность при нормальных условиях, негигроскопичность и нетоксичность. В экспериментах в качестве рабочих были исследованы следующие поликристаллические вещества СНО-состава: метальдегид (metaldehyde) C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O, карбамилгидразин (carbamoyl hydrazine) CH<sub>5</sub>N<sub>3</sub>O, оксибензойная кислота (oxybenzoic acid) C<sub>7</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub> и диоксibenзол (dihydroxybenzene) C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>. Все четыре вещества представляют собой бесцветные кристаллы с невысокой температурой плавления и используются в фармацевтической и пищевой промышленности [17].

Для изготовления образцов для испытаний этих веществ, включая тонко измельченный полиоксиметилен, использовались три вида связующих: фторопластовый лак (fluoroplastic lacquer), эпоксидная смола (epoxy resin) и клейкая лента. Наиболее информативными оказались эксперименты с образцами, в которых исследуемые вещества были нанесены тонким слоем под давлением на клейкую ленту. Рассчитанные термодинамические параметры, сравнительные коэффициенты догорания  $N$ , энергетические составляющие коэффициента эффективности  $K$  и экспериментальные значения удельного им-

**Таблица 2.** Сравнительные коэффициенты догорания  $N$ , энергетические составляющие коэффициента эффективности  $K \approx [1 + 2.5(Q_{det}/Q^* + NQ_{db}/Q^*)]^{1/2}$  и соответствующие ему значения  $C_m$  для поликристаллических веществ

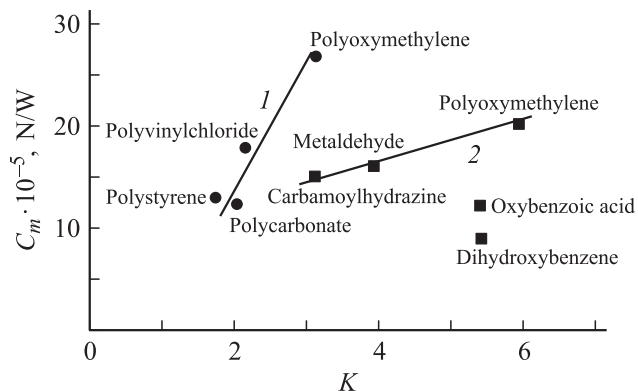
Вещество	$Q_{det}, \frac{kJ}{kg}$	$Q_{db}, \frac{kJ}{kg}$	$N$	$Q^*, \frac{kJ}{kg}$	$Q_{det}/Q^*$	$N \cdot Q_{db}/Q^*$	$K$	$K_{av}$	$C_m \cdot 10^{-5} \text{ NW}$	$C_{mav} \cdot 10^{-5}, \text{ N/W}$
Polyoxymethylene	2692	14 614	1	1200	2.24	12.18	6.09	5.96	20	20.25
»	2692	14 614	1	1314	2.05	11.12	5.82		20.5	
Metaldehyde	698.9	24 391	2.04	3925	0.18	6.10	4.09	3.93	15	15.5
»	698.9	24 391	–»–	4733	0.15	5.15	3.77		16	
Carbamoyl hydrazine	397.6	10 685	3.86	2750	0.14	3.89	3.33	3.08	15.5	15.25
» »	397.6	10 685	3.86	3971	0.10	2.69	2.82		15	
Oxybenzoic acid	32.7	20 937	0.71	974	0.03	15.26	6.26	5.42	10	12
» »	32.7	20 937	0.71	1867	0.02	7.96	4.58		14	
Dihydroxybenzene	277.6	24 475	0.74	1425	0.19	12.71	5.77	5.42	7.2	8.9
»	277.6	24 475	0.74	1860	0.15	9.74	5.07		10.6	

пульса реактивной отдачи  $C_m$  для перечисленных поликристаллических веществ представлены в табл. 2.

Результаты расчетов коэффициентов эффективности  $K$  (для плотности энергии 8–10, 13–14 Дж/см<sup>2</sup> соответственно и  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ) и полученных значений  $C_m$  позволяют сделать вывод, что в случае использования поликристаллических рабочих веществ удельный импульс реактивной отдачи зависит в большей степени от детонационной составляющей энергии сгорания, чем от составляющей энергии догорания продуктов детонации в кислороде воздуха. Причем максимальный  $C_m$  имеет место при малых значениях  $Q^*$  в соответствии с выражением для  $K \approx [1 + 2.5(Q_{det}/Q^* + NQ_{db}/Q^*)]^{1/2}$ , где второй и третий члены максимальны при малых удельных энергиях лазерного импульса.

На рис. 4 представлены экспериментальные данные зависимости  $C_m$  от коэффициента эффективности  $K$  для полимерных рабочих веществ (кривая 1) в интервале  $1.75 \leq K \leq 3.12$ . Видно, что для исследованных полимеров, независимо от того, есть ли в их составе кислород, при атмосферных условиях имеет место зависимость  $C_m \approx K \sim [1 + 2.5(Q_{det}/Q^* + NQ_{db}/Q^*)]^{1/2}$ .

На рис. 4, кривая 2 соответствует зависимости  $C_m$  от коэффициента  $K$  для поликристаллических ра-



**Рис. 4.** Графики зависимости  $C_m$  от  $K$  для полимерных (1) и поликристаллических (2) рабочих СНО-веществ.

бочих веществ, значения которого для полиоксиметилена ( $N = 1$ ), метальдегида и карбамоилгидразина ( $N > 1$ ) отвечают пропорциональности в интервале  $3.08 \leq K \leq 5.96$ . Значения зависимости  $C_m$  от  $K$  для диоксибензола и оксибензойной кислоты ( $N < 1$ ) имеют большой разброс и не отвечают зависимости  $C_m \sim K \approx [1 + 2.5(Q_{det}/Q^* + NQ_{db}/Q^*)]^{1/2}$ .

## Обсуждение результатов экспериментальных исследований

Проведенные эксперименты позволяют сделать предположение, что при лазерной детонации СНО-веществ высокотемпературный процесс догорания продуктов детонации испаренного вещества в кислороде воздуха для всех веществ одинаков — это окисление выделившегося атомарного углерода и газообразного водорода с образованием молекул углекислого газа и воды. При этом процесс догорания (максимальная константа скорости газофазных реакций  $k(T) \sim 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ) происходит вслед за реакцией детонации и лимитирован ограниченным количеством кислорода воздуха.

Следует отметить особенность лазерно-химических реакций — их быстроту. Эксперимент в [18] показал, что реакции, инициированные ИК-излучением, могут протекать со скоростью взрывных процессов (время химического превращения  $\sim 10^{-5} \text{ s}$ ). В ряде опытов было установлено, что время облучения  $10^{-5} \text{ s}$  достаточно для полного протекания реакции.

Анализ результатов экспериментов с полимерными материалами показывает, что самое высокое значение  $C_m = 27 \cdot 10^{-5} \text{ N/W}$  у кислородсодержащего линейного полимера полиоксиметилена с высокой детонационной составляющей вклада в удельный импульс реактивной отдачи и имеющего ярко выраженную область поглощения С–О–С валентными колебаниями  $\text{CO}_2$ -излучения. Другой кислородсодержащий полимер с линейной ароматической цепью — поликарбонат, имеющий слабое

поглощение, обусловленное деформационными колебаниями С–Н-связи и низкую детонационную составляющую  $K$ , показал, как и следовало ожидать, низкий уровень  $C_m = 12.5 \cdot 10^{-5}$  N/W. Линейные полимеры полистирол и поливинилхлорид не показали высоких значений  $C_m$  ( $13 \cdot 10^{-5}$  и  $18 \cdot 10^{-5}$  N/W соответственно), так как в процессе их сгорания отсутствует детонационная составляющая, и основной вклад в удельный импульс реактивной отдачи вносят процессы оптического пробоя паров вещества и сгорания их компонентов в кислороде воздуха. К тому же деформационные колебания С–Н- и С–Cl-связей обуславливают незначительное поглощение  $\text{CO}_2$ -излучения.

При взаимодействии излучения с поликристаллическими веществами видно, что детонационная составляющая выделившейся энергии максимальна у полиоксиметилена, превышает более чем в десять раз детонационные составляющие метальдегида и карбамоилгидразина и в сотни раз превышает детонационные составляющие оксибензойной кислоты и диоксибензола. Высокий расчетный коэффициент  $K$ , обусловленный значительной составляющей энергии догорания (детонационные составляющие малы), у оксибензойной кислоты и диоксибензола не приводит к высоким значениям  $C_m$ .

Таким образом, на основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что энергия догорания продуктов детонации исследованных рабочих веществ не оказывает существенного влияния на формирование удельного импульса реактивной отдачи. В случае использования рабочих поликристаллических веществ возможны также потери (распыление в момент оптического пробоя) вещества из плазменной области, что приводит к тому, что значительная часть поликристаллического вещества и свободного углерода (продукта детонации) не сгорает, на что указывает образование дыма в момент лазерного воздействия.

Процессы высокотемпературного окисления продуктов детонации полимерных и поликристаллических веществ, возможно, имеют схожую природу с процессами горения в пламени, где, как известно [19], протекают сложные химические процессы превращения газобразных соединений. В настоящее время механизм и кинетика газофазных реакций горения большинства полимеров не установлены, несмотря на обилие работ в этой области, и вопрос об участии кислорода воздуха в газофазных реакциях остается также невыясненным. Хотя следует отметить, что в работе [3] наблюдалось увеличение удельного импульса реактивной отдачи (примерно на 30%), полученное при использовании полиоксиметилена при переходе от азотной среды к воздуху, т. е. процесс догорания увеличивал значения  $C_m$ .

Несмотря на простоту предложенной модели взаимодействия лазерного импульса с веществами СНО-состава проблема выбора оптимального СНО-вещества оказалась в правильном определении параметра  $Q^*$ -удельной энергии лазерного импульса, необходимой для испарения единицы массы вещества. Определение этого

параметра потребовало проведения специальных экспериментов. Следует отметить также, что высокие значения  $Q^*$  (5000–50 000 kJ/kg), вычисленные усредненным способом для полимеров, дают при расчете небольшие значения  $K$ , которые согласуются с достаточно высокими экспериментальными значениями  $C_m$ . В случае с поликристаллическими веществами вычисленные значения  $Q^*$  существенно ниже (1200–4000 kJ/kg), что приводит при расчетах к значительному увеличению (в два раза для полиоксиметилена) коэффициента  $K$ , но  $C_m$  поликристаллических веществ тем не менее мал и в случае с тонко измельченными образцами из полиоксиметилена оказался в 2.5 раза ниже прогнозируемого увеличения. При этом для обоих состояний (полимерного и поликристаллического) соблюдается своя пропорциональная зависимость  $C_m$  от  $K$  (для  $N \geq 1$ ). На основании вышесказанного можно сделать вывод, что рабочее вещество для ЛРД должно быть хорошо связанным (например, из класса полимеров) и обладать определенным комплексом реологических свойств.

Проведенные эксперименты показали, что для выбора рабочих веществ СНО-состава можно использовать коэффициент  $K$ . Однако необходимо учитывать некоторые особенности взаимодействия лазерного импульса с твердыми рабочими веществами.

1. Параметр  $K$  вычисляется для случая, когда определенная доля  $N$  массы испаренного вещества догорает в кислороде воздуха. Однако при расширении продуктов детонации после пробоя за поверхностью Чепмена–Жуге происходит быстрое остывание газовой смеси, и значительная часть продуктов детонации не способна преодолеть энергию активации ожидаемых химических реакций окисления (догорания).

2. Вещества в поликристаллическом состоянии легко распыляются под воздействием лазерного импульса, теряя часть массы из области взаимодействия.

Таким образом, в действительности коэффициент при  $Q_{db}/Q^*$  в выражении (10) для  $K$  может оказаться существенно меньше  $N$ . В этом случае основной вклад в величину  $K$  вносит детонационная составляющая — это подтверждают результаты экспериментов. Значения  $C_m$  удовлетворительно согласуются с представленной моделью, если рассматривать преимущественно детонационную составляющую энергии сгорания. Уровень  $C_m$  веществ, у которых отсутствует детонационная составляющая (термодинамически невыгодный процесс или отсутствует кислород в составе вещества), обусловлен в основном оптическим пробоем паров испаренного вещества при их взаимодействии с лазерным излучением.

Особенностью проведенных экспериментов является также то, что геометрические параметры области взаимодействия лазерного импульса с различными материалами подбирались так, чтобы сохранить постоянство комплекса  $(I\lambda\sqrt{\tau})$ , где  $I$  — интенсивность лазерного излучения на образце,  $\lambda$  — длина волны излучения,  $\tau$  — длительность лазерного импульса.

Характеристический комплекс  $(I\lambda\sqrt{\tau})$  появляется в теории лазерной абляции [13] как параметр подобия

для описания взаимодействия лазерного импульса с твердыми материалами. В качестве основных положений этой теории рассматриваются:

— материалы, которые обладают свойствами сильного поверхностного поглощения лазерного излучения, при этом толщина образца  $x > 1/\mu_\lambda$ , где  $\mu_\lambda$  — коэффициент поглощения излучения для данной длины волны;

— интенсивность излучения на испытываемом образце соответствует максимальной величине удельного импульса реактивной отдачи в вакууме при отсутствии плазменной экранировки излучения.

В этом случае в соответствии с многочисленными экспериментальными данными [13]:

$$I_{\max}\sqrt{\tau} = \text{const} = B_{\max}, \quad (11)$$

где  $B_{\max} = 8 \cdot 10^4 \text{ W}\sqrt{\text{s}}/\text{cm}^2$  — параметр, при котором достигается максимальное значение  $C_m$ .

Считается также, что поглощение энергии лазерного излучения возникшей плазмой происходит за счет обратного-тормозного эффекта, а коэффициент поглощения  $\mu_\lambda$  равен:

$$\mu_\lambda = (4/3)(2\pi/3kT_e)^{1/2} n_e n_i Z^2 e^6 \times g_g [1 - \exp(-h\nu/kT_e)] / hcm_e^{3/2} \nu^3, \quad (12)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_e$  — электронная температура,  $n_e$  — концентрация электронов,  $n_i$  — концентрация ионов,  $Z$  — степень ионизации плазмы,  $e$  — заряд электрона,  $g_g$  — статистический коэффициент,  $h$  — постоянная Планка,  $\nu$  — частота излучения,  $c$  — скорость света,  $m_e$  — масса электрона.

Распространим приведенную в [13] модель на случай взаимодействия лазерного импульса с твердыми веществами СНО-состава. При соблюдении перечисленных выше условий взаимодействия имеем следующее выражение для скорости абляции, которое характеризует скорость испарения вещества в условиях квазистационарного потока лазерной энергии:

$$\dot{m} = \rho_a \cdot c_a = B_{\max} (I/\lambda\sqrt{\tau})^{1/2}, \quad (3)$$

где  $\rho_a$  — плотность паров испаренного вещества,  $c_a$  — адиабатическое значение скорости звука в парах испаренного вещества.

Высокая температура плазмы приводит к детонации паров вещества. Такая детонация, естественно, приводит к дополнительному повышению давления паров вещества  $p_a$  в области, находящейся между поверхностью образца и внешней границей плазмы. Предполагая, что время детонации и догорания продуктов детонации много меньше характерного газодинамического времени разлета плазмы вблизи поверхности образца, можем записать:

$$p_a = [(1 + \gamma M^2)] \rho_a c_a^2 + \rho_a c_a Q, \quad (14)$$

где  $M$  — число Маха,  $\gamma$  — постоянная адиабаты,  $Q$  — удельная энергия сгорания вещества. С учетом приведенных выше выражений имеем

$$p_a = AI^{3/2}(\lambda\sqrt{\tau})^{-1/4} + B(I/\lambda\sqrt{\tau})^{1/2}Q, \quad (15)$$

где значения коэффициентов  $A$  и  $B$  зависят только от состава вещества. Тогда в соответствии с определением удельного импульса реактивной отдачи  $C_m$  получим

$$C_m = A(I\lambda\sqrt{\tau})^{-1/4} + B(I\lambda\sqrt{\tau})^{-1/2}Q. \quad (16)$$

В соответствии с ранее введенным коэффициентом  $K$  имеем:

$$C_{m2}/C_{m1} = 1 + B/A(I\lambda\sqrt{\tau})^{-1/4}Q$$

или

$$K = 1 + (B/AQ)(I\lambda\sqrt{\tau})^{-1/4}. \quad (17)$$

Как следует из (17), введенный ранее коэффициент  $K$  зависит как от состава рабочего вещества, так и от характеристик лазерного импульса. При условиях, указанных выше, этот параметр можно использовать для прогнозирования характеристик тяги ЛРД с твердым веществом на другие длины волн лазерного излучения по экспериментальным данным, полученным ранее. Однако эти условия иногда нарушаются. В частности, в наших экспериментах взаимодействие излучения Nd-лазера с полиоксиметиленом носило, скорее всего, объемный, а не поверхностный характер. Нарушение условий устойчивой абляции материала привело к соответствующему уменьшению удельного импульса реактивной отдачи из-за уменьшения массы испаренного материала  $\dot{m} = \rho_a c_a$ . К таким нарушениям может относиться экранировка лазерного излучения плазмой оптического пробоя паров материала, которая наблюдалась в экспериментах с другими веществами (см. рис. 3).

## Заключение

Результаты проведенных исследований лазерной детонации веществ СНО-состава показывают, что для выбора рабочих веществ для ЛРД можно использовать параметр  $K$ , который зависит как от состава твердого вещества, так и от характеристик лазерного импульса. При определенных условиях этот параметр можно использовать для прогнозирования характеристик тяги ЛРД с твердым рабочим веществом на другие значения длины волн лазерного излучения.

Однако необходимо учитывать некоторые особенности лазерной абляции твердых СНО-веществ. Параметр  $K$  вычисляется для случая, когда определенная доля  $N$  массы испаренного вещества догорает в кислороде воздуха. Однако при расширении продуктов детонации паров вещества после пробоя за поверхностью Чепмена-Жуге происходит быстрое остывание газовой смеси, и значительная часть продуктов детонации не способна преодолеть энергию активации ожидаемых химических реакций окисления (догорания). В этом случае основной вклад в величину  $K$  вносит детонационная составляющая. Этим можно объяснить лишь незначительное увеличение удельного импульса реактивной отдачи, полученное при использовании полиоксиметилена при переходе от азотной среды к воздуху

в [3]. Это подтверждают наши результаты: значения  $C_m$  удовлетворительно согласуются с представленной моделью детонации СНО-веществ, если доминирует детонационная составляющая (с точностью до неопределенности величины  $N$  для третьего слагаемого в выражении для  $K$ ). Удельный импульс реактивной отдачи  $C_m$  веществ, у которых отсутствует детонационная составляющая (термодинамически невыгодный процесс или отсутствие кислорода в составе вещества), в основном обусловлен пробоем паров испаренного вещества при взаимодействии с лазерным излучением.

Наилучшие результаты по удельному импульсу реактивной отдачи  $C_m$  для  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  показал полиоксиметилен, представляющий собой линейный полимер полиацетальной структуры  $(-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-)_n$  с высокой поглощающей способностью  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  валентными колебаниями  $\text{CO}_2$ -излучения. В составе полиоксиметилена содержится 53% кислорода — окислителя, и индуцируемая лазерным импульсом химическая реакция детонации вещества протекает с высоким тепловым эффектом  $Q_{\text{det}} \approx 2700 \text{ kJ/kg}$ . Такой тепловой эффект присущ веществам, относящимся к классу взрывчатых. Неокисленные углерод и водород догорают в кислороде воздуха с образованием  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  с дополнительным тепловым эффектом. Перечисленные выше характеристики полиоксиметилена приводят к низкой удельной энергии лазерного импульса, необходимой для испарения единицы массы вещества и оптимальному соотношению энергетических вкладов процессов детонации и догорания продуктов детонации при формировании лазерной тяги.

Работа выполнена в рамках контракта 1801 МНТЦ.

## Список литературы

- [1] Бункин Ф.В., Прохоров А.М. // УФН. 1976. Т. 119. Вып. 3. С. 425–446.
- [2] Луукконен Р.А. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 7. С. 76–79.
- [3] Schall W.O., Bohn W.L., Eckel H.-A., Mayerhofer W. et al. // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4065. P. 472.
- [4] Nebolsine P.E., Pirri A.N. // AIP Conf. Proc. 2003. Vol. 664. P. 11.
- [5] Kare J.T. // AIP Conf. Proc. 2003. Vol. 664. P. 22.
- [6] Rather J.D.G. // AIP Conf. Proc. 2003. Vol. 664. P. 37.
- [7] Резунков Ю.А., Сиразетдинов В.С., Стариков А.Д., Чарухчев А.В. // Оптич. журн. 1994. № 1. С. 84–94.
- [8] Агейчик А.А., Борисов М.Ф., Егоров М.С., Лашков В.А., Машек И.Ч., Резунков Ю.А., Савельева В.П., Сафронов А.Л., Степанов В.В. // Оптич. журн. 2003. Т. 70. № 4. С. 65–71.
- [9] Виноградов Б.А., Перепелкин К.Е., Мещерякова Г.П. Действие лазерного излучения на полимерные материалы. СПб.: Наука, 2006. Кн. 1. С. 144, 164. Кн. 2. С. 13, 14, 16.
- [10] Еременко Л.Т., Нестеренко Д.А. Химия детонации. Генерация детонационной энергии взрывчатыми веществами различного атомного состава. Черноголовка: Институт химической физики РАН, 1992. С. 11.
- [11] Nakai S. // AIP Conf. Proc. 2003. Vol. 702. P. 3.

- [12] Pakhomov A.V., Thompson M.S., Gregory D.A. // AIP Conf. Proc. 2003. Vol. 664. P. 194.
- [13] Phipps C.R., Turner T.P., Harrison R.F. et al. // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 64. N 3. P. 1083–1096.
- [14] Larson C.W., Mead F.B., Knecht S.D. // AIP Conf. Proc. 2003. Vol. 702. P. 216.
- [15] Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров. М.: Мир, 1988. С. 39, 97.
- [16] Столяров Е.А., Орлова Н.Г. Расчет физико-химических свойств жидкостей. Л.: Химия, 1976. С. 39–43.
- [17] Химическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1988.
- [18] Басов Н.Г. О квантовой электронике. М.: Наука, 1987. 400 с.
- [19] Асеева Е.Е., Заиков Е.Е. Горение полимерных материалов. М.: Наука, 1981. 280 с.
- [20] Rezunkov Y.A., Safronov A.L., Ageichik A.A., Egorov M.S., Stepanov V.V., Rachuk V.S., Guterman V.Yu., Ivanov A.V., Rebrov S.G., Golikov A.N. // AIP Conf. Proc. 2006. Vol. 830. P. 3.