

УДК 662.7:536.74:662.61

## ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА И ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА ОТ ЕГО ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА И ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ

Д. Б. Лемперт, Е. М. Дорофеев, С. И. Согласнова, Г. Н. Нечипоренко

Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, lempert@icp.ac.ru

Изучено влияние энтальпии образования суммарной композиции и элементного состава композиции ракетного топлива на базе элементов С, Н, N и О на температуру горения и удельный импульс с целью поиска пути создания композиций с температурой горения не выше допустимой, но с максимально высоким удельным импульсом. Найдены количественные зависимости, связывающие вышеуказанные параметры. Показано, что существует определенный коридор в области существования композиций, удовлетворяющих поставленным требованиям по температуре горения и удельному импульсу. Полученные данные позволяют определить возможность создания составов с максимальными значениями удельного импульса.

Ключевые слова: ракетные топлива, температура горения, удельный импульс.

### ВВЕДЕНИЕ

При решении многих практических задач, связанных с созданием смесевых твердых ракетных топлив (СТРТ), ставится требование по ограничению температуры в камере сгорания ( $T_c$ ), так как определенные элементы конструкции (в зависимости от типа двигателя) выходят из строя при высоких температурах. В зависимости от задачи и типа двигателя ограничения по температуре в камере сгорания могут быть совершенно различными: 3 800, 2 300 и даже 1 300 К. Как правило, при изменении композиции конкретного СТРТ снижение  $T_c$  сопровождается и падением величины удельного импульса ( $I_{sp}$ ). Поэтому, решая задачу ограничения  $T_c$  (для обычных топлив  $T_c \geq 3 000$  К), приходится жертвовать величиной удельного импульса, и чем ниже допустимый предел  $T_c$ , тем больше потеря  $I_{sp}$ .

Цель настоящей работы — найти связь между элементным составом ракетного топлива на базе С, Н, N и О, суммарной энтальпией образования композиции ( $\Delta H_f^0$ ) и достигаемыми значениями  $I_{sp}$  и  $T_c$ , а затем на основании выявленных закономерностей показать основные пути создания топлив с максимально высоким удельным импульсом и температурой горения не выше заданной величины, выбранной из диапазона  $T_c = 1 300 \div 2 400$  К.

Следует отметить, что  $I_{sp}$  и  $T_c$  отнюдь

не единственные параметры, определяющие эффективность ракетных топлив. Множество других характеристик, например плотность, термостабильность, совместимость компонентов, скорость горения, зависимость последней от давления и другие, также могут стать определяющими. В настоящей работе задачи по обеспечению требований к другим (кроме требований по  $I_{sp}$  и  $T_c$ ) эксплуатационным параметрам не рассматриваются.

### МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Величины  $I_{sp}$  и  $T_c$  рассчитывали с помощью программы расчета высокотемпературных равновесий ТЕРРА [1] при давлении в камере сгорания 40 атм, на срезе сопла — 1 атм. Массив исходных данных, взятых для расчета, включал более 200 композиций, содержащих С, Н, N и О в количестве: углерод —  $0 \div 21.4$  %, водород —  $1.0 \div 8.13$  %, кислород —  $1.0 \div 1.4$  г-атомов на 1 г-атом углерода (т. е.  $0 \div 1.87C$ , где С — содержание углерода, %), с суммарной энтальпией образования  $\Delta H_f^0 = 0 \div 4 400$  кДж/кг. Поскольку была поставлена задача найти пути снижения температуры горения с минимальными потерями удельного импульса, следовало изучить, как влияют основные характеристики композиции (суммарная энтальпия образования, элементный состав) на величины  $I_{sp}$  и  $T_c$ . Повышение  $\Delta H_f^0$  исходной композиции однозначно увеличивает

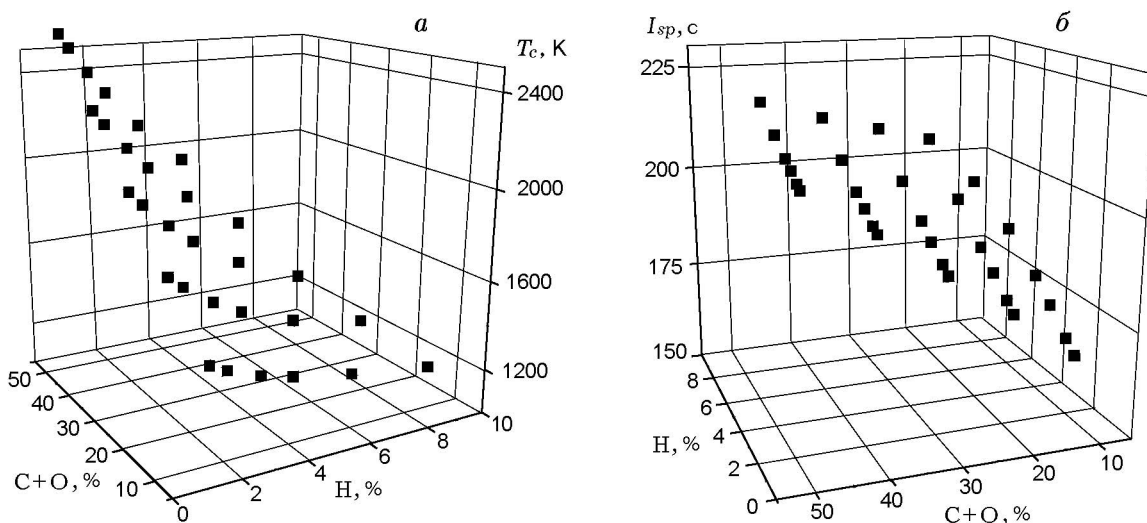


Рис. 1. Зависимость  $T_c$  (а) и  $I_{sp}$  (б) от содержания водорода и углерода с кислородом при  $O/C = 1$  ( $\Delta H_f^0 = 1100$  кДж/кг)

$I_{sp}$  и  $T_c$ ; рост доли водорода при прочих равных условиях, как правило, снижает  $T_c$  и повышает  $I_{sp}$ .

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Были рассчитаны значения  $I_{sp}$  и  $T_c$  для широкого набора описанных выше композиций. Вначале рассчитывали композиции с соотношением атомов  $O/C = 1$ . При  $O/C < 1$  значительная часть исходного углерода образует метан и сажу. Вместе с тем при  $O/C < 1$  резко уменьшается тепловыделение, это должно существенно снижать удельный импульс.

На рис. 1 показаны зависимости  $I_{sp}$  и  $T_c$  от массовой доли водорода, углерода при  $C/O = 1$  ( $\Delta H_f^0 = 1100$  кДж/кг).

Найдено, что для композиций, значения  $T_c$  которых лежат в интервале  $1300 \div 2400$  К, величины  $T_c$  и  $I_{sp}$  можно описать эмпирическими формулами:

$$T_c \text{ [K]} = 930.8 - 147.8H + 5.7H^2 + 18.7(C + O) + 0.029(C + O)^2 + 0.63\Delta H_f^0 - 4.1 \cdot 10^{-5}(\Delta H_f^0)^2$$

(среднее отклонение 40 К),

$$I_{sp} \text{ [с]} = 124.1 + 5.31H - 0.16H^2 + 1.08(C + O) - 0.0009(C + O)^2 + 0.024\Delta H_f^0 - 2.7 \cdot 10^{-7}(\Delta H_f^0)^2$$

(среднее отклонение 1.2 с),

где массовое содержание элементов дано в процентах.

Были построены поверхности, соответствующие постоянным значениям  $T_c$  (на рис. 2, а —  $T_c = 1500$  К) и  $I_{sp}$  (на рис. 2, б —  $I_{sp} = 200$  с) как функции вышеуказанных параметров. Условие  $T_c < 1500$  К на рис. 2, а соблюдается для всех точек пространства, лежащих ниже поверхности, образуемой представленными точками, а на рис. 2, б условие  $I_{sp} > 200$  с соблюдается для всех точек пространства, лежащих выше поверхности, образуемой представленными точками. Обработка всех расчетных данных позволила получить интересную зависимость (рис. 3). На рис. 3 кривые, ниспадающие по мере роста  $\Delta H_f^0$ , — это граничные условия по величине  $I_{sp}$  (при заданном содержании  $C + O$  ( $O/C = 1$ ) в композиции весь набор точек по содержанию водорода и  $\Delta H_f^0$ , лежащий правее, например, кривой 1, удовлетворяет условию  $I_{sp} > 180$  с), а кривые, восходящие по мере роста  $\Delta H_f^0$ , — это граничные условия по величине  $T_c$  (при заданном содержании  $C + O$  в композиции весь набор точек по содержанию водорода и  $\Delta H_f^0$ , находящийся левее, например, кривой 5, удовлетворяет условию  $T_c < 1500$  К). Поэтому условие  $T_c < 1500$  К при  $I_{sp} > 180$  с может быть выполнено только для точек пространства, расположенных выше точки пересечения кривых 1 и 5 (точка А), т. е. в зоне, ограниченной отрезка-

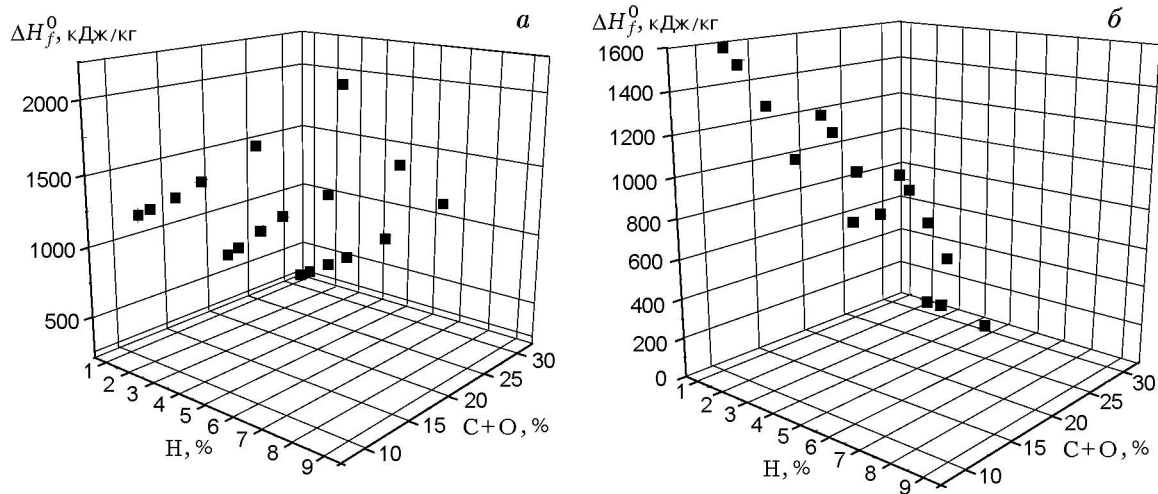


Рис. 2. Граничные условия для выполнения требований  $T_c < 1500$  К (а) и  $I_{sp} > 200$  с (б)

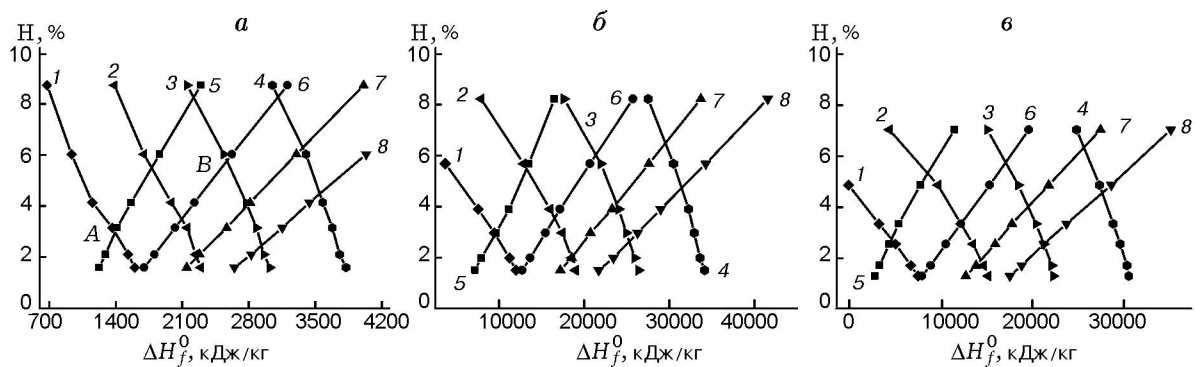


Рис. 3. Области существования решения « $I_{sp}$  выше заданной величины при  $T_c$  ниже допустимой»: кривые 1-4 —  $I_{sp} = 180$  (1), 200 (2), 220 (3), 240 с (4); кривые 5-8 —  $T_c = 1500$  (5), 1800 (6), 2100 (7), 2400 К (8); C + O = 10 (а), 20 (б), 30 % (в)

ми 1А и А5, а условие  $T_c < 1800$  К при  $I_{sp} > 220$  с — для точек пространства, ограниченного отрезками 3В и В6. Видно, что достижение относительно высоких значений удельного импульса ( $>220$  с) при существенном ограничении  $T_c$ , например при  $T_c < 1500$  К, чрезвычайно трудно осуществить, так как при любых содержаниях углерода и любых значениях  $\Delta H_f^0$  массовая доля водорода должна быть не ниже 8 %, при этом энтальпия образования должна находиться в очень узком диапазоне, в противном случае одно из требований ( $I_{sp}$  выше требуемой величины или  $T_c$  ниже предельно допустимой) не будет удовлетворено.

Очень интересную картину можно наблюдать, если все точки из диапазона  $T_c = 1300 \div 2400$  К нанести на график в координатах  $I_{sp}$ ,  $T_c$  (рис. 4). Видно, что существует коридор возможных значений  $I_{sp}$  при заданной темпе-

ратуре  $T_c$ . Самые верхние точки соответствуют высокому содержанию водорода —  $\approx 8$  %, которое практически недостижимо в твердо-топливной самогорящей композиции. Ширина коридора сужается при снижении максимального содержания водорода, на рис. 4 приведено несколько таких прямых, ограничивающих коридор сверху. Таким образом, данные на рис. 4 позволяют сразу отрицательно ответить на вопрос о возможности создания композиций с определенными требованиями, например,  $I_{sp} \geq 240$  с при  $T_c \leq 1600$  К.

Показано, что в среднем снижение  $T_c$  на 100 К уменьшает  $I_{sp}$  на 4.8 с, т. е.  $dI_{sp}/dT_c \approx 0.048$  с/К. Зависимость максимально достигнутого значения  $I_{sp}$  от доли водорода в композиции можно приблизительно оценить по выражению

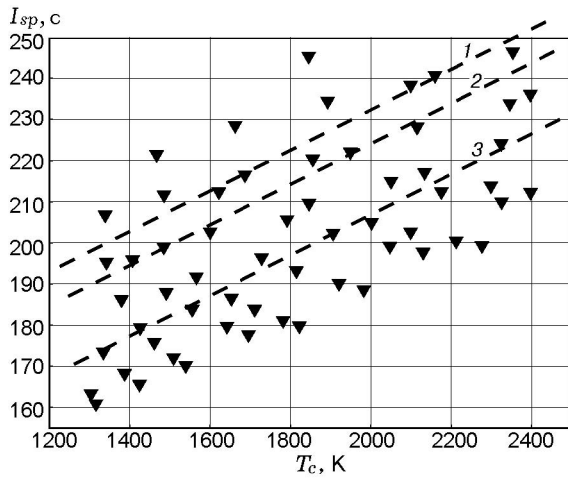


Рис. 4. Зависимость  $I_{sp}(T_c)$  для составов, содержащих водород  $1 \div 8.7$  %, углерод  $4.3 \div 21.4$  %, кислород в количестве, равном содержанию углерода, остальное — азот, при  $\Delta H_f^0 = 0 \div 4400$  кДж/кг:

штриховыми прямыми показаны границы для составов с содержанием водорода не выше  $6.0$  % (1), не выше  $4.9$  % (2), не выше  $2.8$  % (3)

$$I_{sp,max} = 87.6 + 8.1H + 0.048T_c, \quad (1)$$

где массовое содержание  $H$  дано в процентах. Формула (1) выведена для составов с  $T_c = 1400 \div 2400$  К. Таким образом, если композиция содержит, например,  $2.7$  % водорода, а  $T_c \leq 3100$  К, то величина  $I_{sp}$  может достигать значений  $\approx 255 \div 257$  с. Но если  $T_c$  ограничить значением  $2100$  К, то даже при содержании водорода  $5$  % максимально достижимой величиной удельного импульса станет  $I_{sp,max} \approx 229$  с; при  $T_c = 1800$  К —  $I_{sp,max} \approx 214$ ; при  $T_c < 1500$  К —  $I_{sp,max} \approx 210$  с. При содержании водорода ниже  $5$  % каждое из вышеприведенных значений  $I_{sp,max}$  уменьшится на  $8.1$  с на каждый  $1$  % (абс.) снижения содержания водорода.

Приведенные выше данные относились к системам, где  $O/C = 1$ . Изменяются ли приведенные закономерности, если допустить, что кислород входит в композицию в ином количестве? Очевидно, что в большинстве систем увеличение доли кислорода выше  $O/C = 1$  до определенного предела приводит к росту как  $T_c$ , так и  $I_{sp}$ . Чтобы выяснить, прирост какой из этих величин будет превалировать, были проведены расчеты  $I_{sp}$  и  $T_c$  для композиций, близких к вышеописанным, но в которых соотношение  $O/C$  изменялось в пределах  $0.66 \div 1.43$ . Часть полученных данных представлена на рис. 5. Видно,

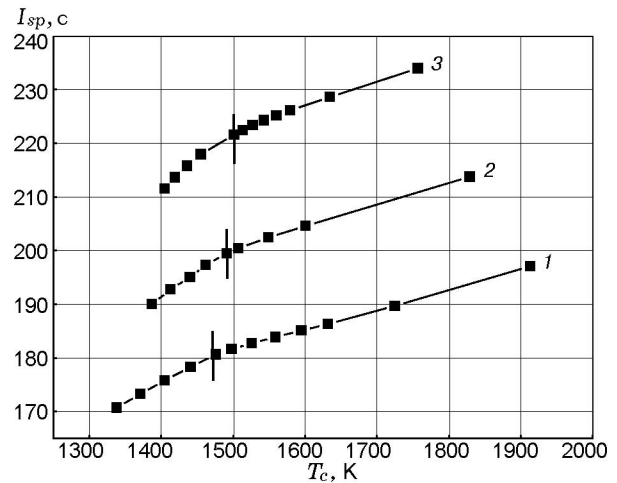


Рис. 5. Зависимость  $I_{sp}(T_c)$  для составов с различным содержанием водорода и разными значениями соотношения  $O/C$ :

слева направо на каждой кривой величина  $O/C$  растет от  $0.66$  до  $1.43$ , точки, пересеченные вертикальной чертой, соответствуют  $O/C = 1$ ; содержание углерода везде  $8.57$  %;  $1$  —  $2.83$  %  $H$ ,  $\Delta H_f^0 = 951$  кДж/кг,  $2$  —  $5.14$  %  $H$ ,  $\Delta H_f^0 = 1311$  кДж/кг,  $3$  —  $8.13$  %  $H$ ,  $\Delta H_f^0 = 1694$  кДж/кг

что при  $O/C > 1$  зависимость  $I_{sp}(T_c)$  практически линейная ( $dI_{sp}/dT_c \approx 0.042$  с/К). По мере роста соотношения  $O/C$  величина  $dI_{sp}/dT_c$  несколько падает, но незначительно, причем падение тем больше, чем ниже доля углерода в композиции. В целом все составы с атомным соотношением  $O/C > 1$  (по крайней мере, до  $1.4$ ) также попадают в вышеописанный коридор для составов с  $O/C = 1$  (ср. рис. 4 и 5).

Однако при  $O/C < 1$  (левые части кривых на рис. 5 до точки, соответствующей  $O/C = 1$ ) производная  $dI_{sp}/dT_c$  резко (практически в два раза) растет, т. е. потеря каждого градуса в величине  $T_c$  обходится уже потерей  $\approx 0.09$  с в величине  $I_{sp}$ . Причиной этого, естественно, является то, что при  $O/C < 1$  часть углерода в продуктах сгорания образует сажу и, что самое нежелательное, часть водорода связывается с избыточным углеродом в метан — газ хотя и легкий, но пятиатомный, а это резко снижает тепловой КПД.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для создания композиций с максимальным значением  $I_{sp}$  при ограничении  $T_c$  необязательно удерживать соотношение атомов  $O/C$  около единицы (оно может быть и выше) — основным

условием является повышение доли водорода. С другой стороны, снижение содержания кислорода путем создания композиций с соотношением  $O/C < 1$  существенно усложняет задачу снижения  $T_c$  с минимумом потерь в величине  $I_{sp}$ .

Полученные количественные зависимости между элементным составом композиции, ее теплосодержанием, величинами  $I_{sp}$  и  $T_c$  могут стать базой для дальнейшего конструирования составов смесевых твердых ракетных топлив с

максимально высокой величиной  $I_{sp}$  при условии, что  $T_c$  не превысит допустимое значение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Trusov B.G.** Program system TERRA for simulation phase and thermal chemical equilibrium // Proc. of the XIV Intern. Symp. on Chemical Thermodynamics. — St-Petersburg, Russia, 2002. — P. 483–484.

*Поступила в редакцию 22/V 2011 г.*

---