

УДК 621.454.3

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ ГОРЮЧЕГО И ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Е. А. Салганский<sup>1</sup>, Х. Р. Махмудов<sup>2</sup>, А. В. Байков<sup>1</sup>, Л. С. Яновский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, sea@icp.ac.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991 Москва

Предложена методика расчета оптимального соотношения горючего и твердого топлива в газогенераторе высокоскоростного летательного аппарата. Для описания процессов в газогенераторе используется термодинамический подход. Соотношение объемов твердого топлива и горючего в газогенераторе определяется их физико-химическими свойствами. Увеличение плотности и теплоты сгорания твердого топлива, а также пористости горючего приводит к снижению объемной доли твердого топлива в газогенераторе. Увеличение плотности, удельной теплоемкости, удельной теплоты сублимации и температуры сублимации горючего приводит к увеличению объемной доли твердого топлива в газогенераторе.

Ключевые слова: газификация, твердое горючее, высокоскоростной летательный аппарат.

DOI 10.15372/FGV20190611

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведутся активные исследования по развитию высокоскоростных летательных аппаратов (ВЛА), оснащаемых прямоточным воздушно-реактивным двигателем (ПВРД) внутриатмосферного применения, работающим на твердом топливе [1, 2]. Преимуществами двигателей такого типа над жидкостными ракетными двигателями, несомненно, являются улучшенные эксплуатационные характеристики, а также большая дальность полета. Как было показано в [1], высокую дальность полета ВЛА в условиях жестких ограничений может обеспечить применение высокоплотного твердого топлива — относительная дальность полета по сравнению с керосином увеличивается более чем на 20 %. Это можно объяснить тем, что плотность твердого топлива (при одинаковой массовой теплотворной способности) выше, чем жидкого, и в одном и том же объеме корпуса летательного аппарата можно будет разместить большую массу твердого топлива. А это значит, что для ВЛА твердое топливо гораздо эффективнее, чем авиационный керосин. Именно поэтому актуальна задача создания ВЛА, оснащенных ПВРД, рабо-

тающими на твердом топливе.

Исследование низкотемпературных газогенераторов проводились и ранее, например, в ФНПЦ «Алтай», ГНЦ НИИ прикладной химии, НИИПМ и др. Однако в этих исследованиях главным требованием к газогенераторам было отсутствие горючих продуктов [3] и высокая газопроизводительность при минимальной теплоте сгорания [4], в то время как в нашей задаче газообразные продукты должны иметь максимальную калорийность.

Описание процесса в ПВРД можно условно разбить на следующие подзадачи: описания работы газогенератора, работы системы охлаждения стенок камеры сгорания [5] и работы камеры сгорания [6]. Результаты решения одной из перечисленных подзадач являются начальными и граничными условиями следующей. Оптимизация работы ПВРД требует согласования оптимальных решений всех подзадач с учетом требований к тактико-техническим характеристикам ВЛА.

Целью работы является создание методики расчета энергетически оптимального соотношения твердого топлива и горючего в газогенераторе ПВРД.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Тот факт, что при скоростях полета с числами Маха  $M \geq 4$  в результате трения об атмо-

Работа выполнена по теме государственного задания ИПХФ РАН № 0089-2015-0221.

© Салганский Е. А., Махмудов Х. Р., Байков А. В., Яновский Л. С., 2019.

сферный воздух элементы двигателя ВЛА значительно нагреваются, делает атмосферу неэффективным охладителем. При этом температура газов в камере сгорания может превышать 2500 К. Для устранения данной проблемы наиболее часто рассматривается активное охлаждение двигателя углеводородным топливом, размещенным на борту ВЛА [7]. Для создания низкотемпературного газогенератора используется комбинированный заряд, схема которого показана на рис. 1 [8].

В этом заряде самогорящее твердое топливо и газифицируемое горючее располагаются последовательно. Данный класс газогенераторов относится к низкотемпературным. За время работы такого газогенератора происходит сгорание твердого топлива (ТТ) и образуется поток горячего газа, который проходит через пористый слой, состоящий из элементов твердого горючего (ТГ). При контакте с горячими газами твердое горючее газифицируется (сублимируется), процесс происходит при фильтрации высокотемпературного газа [9–11]. ТГ разлагается полностью или частично на более простые летучие соединения, и вследствие его эндотермической деструкции расходуется часть внутренней энергии газов. Таким образом, температура газов при тчении через заряд ТГ уменьшается, а его масса увеличивается за счет притока газообразных продуктов газификации. При прохождении через каналы рубашки охлаждения поток газа охлаждает камеру сгорания ВЛА, а потом поступает в него в качестве горючего.

Таким образом, основная задача ТТ — обеспечение потока горячего газа для газификации ТГ. Соотношение объемов ТТ и ТГ в газогенераторе определяется их физико-химическими свойствами. В оптимальном случае все тепло, выделившееся при сгорании ТТ, должно пойти на газификацию ТГ. Для расчета соотношения объемов ТТ и ТГ в газогене-

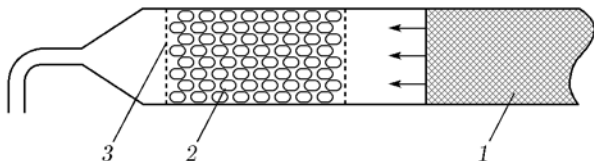


Рис. 1. Газогенератор с последовательно расположенными зарядами твердого топлива (1) и твердого горючего (2), подвергаемого газификации (3 — решетка)

раторе предлагается следующий подход.

Рассматриваем адиабатический случай, т. е. без потерь тепла через стенки газогенератора. Для описания процессов используем термодинамический подход. Полагаем, что химического взаимодействия между продуктами сгорания ТТ и газификации ТГ нет, что вполне справедливо при температурах гораздо ниже 1000 К. Учет химического взаимодействия может приводить к снижению равновесной температуры продуктов за счет эндотермических реакций (например, взаимодействие  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  с продуктами газификации ТГ). Пренебрегая химическим взаимодействием, получаем оценку сверху по равновесной температуре продуктов и соответственно оценку снизу по времени работы ПВРД. Теплофизические характеристики веществ полагаем постоянными. Так, удельная теплоемкость большинства газов в интервале температуры 300 ÷ 1000 К изменяется менее чем на 3 ÷ 5 %. Полагаем, что все тепло, выделяющееся при сгорании ТТ, расходуется на газификацию ТГ. Количество этого выделившегося тепла определяем на основе закона сохранения энергии с помощью программы расчета высокотемпературных термодинамических равновесий TERRA [12].

Теплота, выделяющаяся при сгорании ТТ, рассчитывается по формуле

$$Q_T = \rho_T V_T (\Delta H_{re}^{T_0} - \Delta H_{pr}^{T_S}),$$

теплота, расходуемая на газификацию ТГ, — по формуле

$$Q_G = (1 - \theta) \rho_G V_G [c_G (T_S - T_0) + L_S].$$

Приравнивая эти формулы и опуская промежуточные выкладки, получаем выражение для расчета объемной доли ТТ в газогенераторе:

$$a_T = \frac{V_T}{V_T + V_G} = \left\{ 1 + \frac{\rho_T (\Delta H_{re}^{T_0} + \Delta H_{pr}^{T_S})}{(1 - \theta) \rho_G [c_G (T_S - T_0) + L_S]} \right\}^{-1},$$

где  $Q$  — теплота,  $\rho$  — истинная плотность,  $V$  — объем,  $T$  — температура,  $c$  — теплоемкость,  $L$  — удельная теплота сублимации (теплота фазового перехода),  $\theta$  — пористость горючего,  $\Delta H$  — энтальпия. Индексы: т — твердое топливо, г — твердое горючее, 0 — начальное

Таблица 1

## Характеристики твердых горючих

Горючее	Состав	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , Дж/(кг·К)	$L_{destr}$ , кДж/кг	$T_{destr}$ , К	$Q_r$ , МДж/кг
Г1	Сетчатый сополимер ПММА	1 200	1 420	578	600	26.2
Г2	Полистирол сшитый	1 100	1 200	648	700	43.3
Г3	Полиэтилен сшитый	930	1 900	3 857	800	46.4
Г4	Уротропин	1 270	1 470	709	500	30.1

Примечания.  $\rho$  — плотность,  $c$  — удельная теплоемкость,  $L_{destr}$  — теплота деполимеризации (разложения),  $T_{destr}$  — температура термодеструкции,  $Q_r$  — теплота сгорания, ПММА — полиметилметакрилат.

Таблица 2

## Характеристики твердых топлив

Топливо	Состав	Формула	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\Delta H_f$ , кДж/кг
T1	Нитроцеллюлоза с 13 % азота	$C_6H_{7.4159}N_{2.5841}O_{10.1682}$	1 660	-2 491.3
T2	Октоген	$C_4H_8N_8O_8$	1 900	292.6
T3	АДНА : УС : А1 = 71 : 11 : 18	$N_4H_4O_4H_{11921}C_{7215}O_{68}Al$	1 721	-845.5
T4	ПХА : УС : А1 = 71 : 11 : 18	$NH_4ClO_4H_{11921}C_{7215}O_{68}Al$	1 815	-1 818.2

Примечания. АДНА — динитрамид аммония, УС — углеводородное связующее, ПХА — перхлорат аммония.

значение,  $S$  — сублимация,  $re$  — исходные реагенты,  $pr$  — продукты. Здесь температура сублимации  $T_S$  — это условное значение температуры, при которой реализуется максимальная скорость термодеструкции горючего. В расчетах значение  $T_S$  принимается в качестве конечной (равновесной) температуры продуктов сгорания и продуктов газификации. Из определения  $a_T$  видно, что объемная доля ТГ в газогенераторе увеличивается с ростом плотности, удельной теплоемкости, удельной теплоты и температуры сублимации ТГ и уменьшается с увеличением плотности и теплоты сгорания ТГ и пористости ТГ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Проведем расчет соотношения долей горючего и твердого топлива в газогенераторе общего объема 1 м<sup>3</sup> для различных типов ТГ и ТТ. В табл. 1 представлены основные характеристики ТГ. Данные по полимерным материалам взяты из справочника [13]. Пористость ТГ полагаем равной 0.3. В табл. 2 приведены основные характеристики ТТ, заимствованные из работы [14], где применялась аналогичная методика расчета. В данной работе мы рас-

считываем в том числе и металлизированные топлива с целью определения влияния теплофизических характеристик ТГ на его содержание в комбинированном заряде газогенератора. В реальном газогенераторе использование металлизированных топлив нежелательно, поскольку возможно забивание каналов рубашки охлаждения камеры сгорания ВЛА твердыми частицами.

В табл. 3 представлены результаты расчета объемной доли топлива в газогенераторе при сочетании указанных выше типов ТГ и ТТ. В случае использования горючего типа Г1 объемная доля любого ТГ не превышает 10 %. Похожие результаты имеют место при использовании горючего типа Г2 и Г4. Для горючих типа Г2 или Г4 максимальная объемная доля ТГ составляет примерно 10 %. В случае использования горючего типа Г3 объемная доля ТГ находится в диапазоне 20 ÷ 30 %. Увеличение количества ТГ для сублимации горючего Г3 по сравнению с горючими Г1, Г2 и Г4 связано с большими значениями теплоемкости и теплоты деполимеризации Г3. Поэтому для сублимации равного количества горючего Г3 необходимо затратить больше энергии.

В табл. 4 представлены результаты расче-

Таблица 3  
Объемная доля топлива  
в комбинированном заряде газогенератора

Топливо	Горючее			
	Г1	Г2	Г3	Г4
T1	0.095	0.101	0.309	0.097
T2	0.071	0.076	0.243	0.073
T3	0.061	0.065	0.208	0.063
T4	0.059	0.063	0.203	0.061

та удельного теплосодержания ТГ для заряда газогенератора общим объемом  $1 \text{ м}^3$ . Удельное теплосодержание рассчитывалось как теплота сгорания продуктов разложения ТГ при их соединении с атмосферным воздухом. При этом начальное теплосодержание продуктов разложения ТГ, равное теплоте сгорания ТТ, не учитывалось. Удельное теплосодержание горючего типа Г1 составляет порядка  $20\,000 \text{ МДж/м}^3$  в сочетании с любым типом ТТ, а горючего типа Г2 — порядка  $30\,000 \text{ МДж/м}^3$  в сочетании с любым типом ТТ. Удельное теплосодержание горючего типа Г3 варьируется в диапазоне  $21\,000 \div 24\,000 \text{ МДж/м}^3$  в сочетании с используемыми типами ТТ. В случае горючего типа Г4 удельное теплосодержание порядка  $25\,000 \text{ МДж/м}^3$  в сочетании с любым типом ТТ. Таким образом, максимальное количество энергии в газогенераторе объемом  $1 \text{ м}^3$  реализуется при использовании горючего Г2, а минимальное — для Г1. При этом следует отметить, что несмотря на то, что горючее Г3 имеет наибольшую теплоту сгорания из рассматриваемых горючих, по удельному теплосодержанию его обходят горючие типа Г2 и Г4. Это объясняется наибольшими теплоемкостью

Таблица 4  
Удельное теплосодержание  
твердого горючего ( $\text{МДж/м}^3$ )

Топливо	Горючее			
	Г1	Г2	Г3	Г4
T1	19 928	29 960	20 879	24 174
T2	20 436	30 797	22 860	24 797
T3	20 671	31 190	23 919	25 084
T4	20 701	31 243	24 070	25 119

и теплотой разложения горючего Г3. Поэтому для его газификации необходимо большее количество ТТ, и, следовательно, в газогенераторе будет размещаться меньше горючего.

Необходимость использования пористого ТГ является слабым местом рассматриваемого газогенератора. Наличие свободного объема в ТГ необходимо для фильтрации через него горячих газов сгорания ТТ. При этом заполняемость газогенератора горючим снижается с увеличением пористости ТГ, что отражается на характеристиках полета ВЛА. Выберем для анализа два комбинированных заряда — с минимальной (заряд Г1-Т4) и максимальной (заряд Г3-Т1) долей ТТ — и оценим влияние пористости ТГ на объемную долю топлива в газогенераторе и удельное теплосодержание горючего. Результаты расчета объемной доли топлива в газогенераторе при разной пористости ТГ представлены на рис. 2. Видно, что уменьшение пористости ТГ приводит к линейному увеличению объемной доли ТТ. Уменьшение пористости ТГ ведет к большей заполняемости газогенератора горючим, что требует большего тепла на его сублимацию и соответственно большего количества ТТ. Однако уменьшить пористость ТГ до нуля невозможно, так как необходимо поровое пространство для фильтрации через него горячих газов сгорания ТТ.

На рис. 3 представлен результат расчета удельного теплосодержания твердого горючего (в газогенераторе общим объемом  $1 \text{ м}^3$ ) при разной его пористости. Видно, что умень-

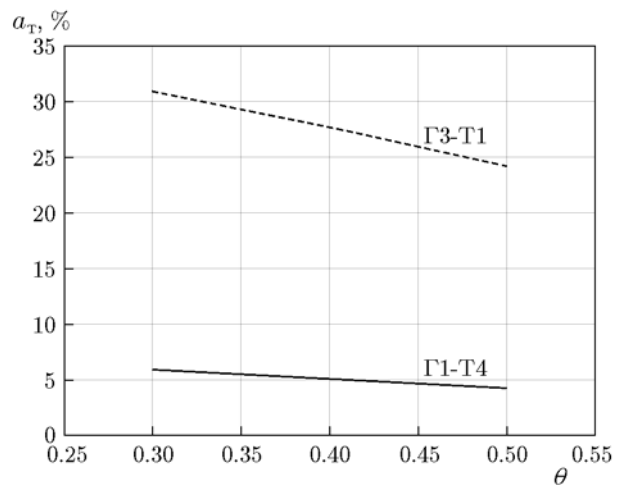


Рис. 2. Объемная доля топлива в газогенераторе при разной пористости ТГ

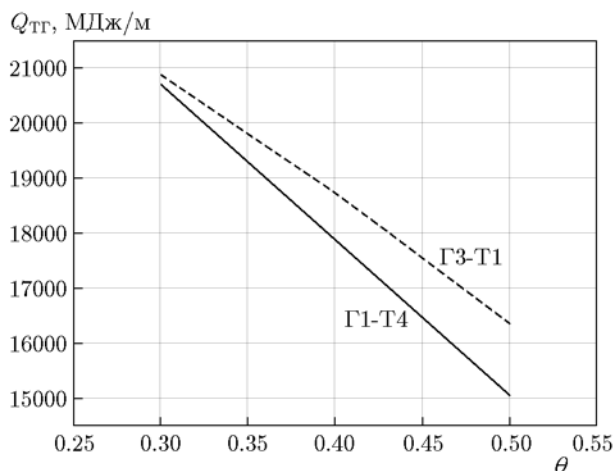


Рис. 3. Удельное теплосодержание твердого горючего (в газогенераторе общего объема  $1 \text{ м}^3$ ) при разной пористости ТГ

шение пористости ТГ приводит к значительному увеличению удельного теплосодержания ТГ. Уменьшение пористости ТГ с 0.5 до 0.3 ведет к увеличению его удельного теплосодержания в случае заряда Г3-Т1 с 16 300 до 20 900 МДж/м<sup>3</sup>, а в случае заряда Г1-Т4 — с 15 000 до 20 700 МДж/м<sup>3</sup>.

Следует отметить, что разница между теплосодержанием рассматриваемых зарядов снижается с уменьшением пористости ТГ. Если для пористости горючего, равной 0.5, теплосодержание рассматриваемых зарядов отличается на 1 300 МДж/м<sup>3</sup>, то при пористости 0.3 эта разница составляет всего 200 МДж/м<sup>3</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика расчета оптимального соотношения объемных долей горючего и твердого топлива в газогенераторе высокоскоростного летательного аппарата. В газогенераторе используется заряд с последовательным расположением самогорящего твердого топлива и газифицируемого горючего. Соотношение объемов твердого топлива и горючего в газогенераторе определяется их физико-химическими свойствами. Увеличение плотности и теплоты сгорания твердого топлива, а также пористости горючего приводит к снижению объемной доли твердого топлива в газогенераторе. Увеличение плотности, теплоемкости, удельной теплоты сублимации и температуры сублимации горючего приводит к увеличению объемной доли твердого топлива в газогенераторе.

В случае использования горючих типа сетчатый сополимер полиметилметакрилат, сшитый полистирол или уротропин объемная доля любого рассматриваемого твердого топлива не превышает 10 %. В случае использования горючего типа сшитый полиэтилен объемная доля топлива составляет 20 ÷ 30 %. Минимальное значение теплоты сгорания твердого горючего в газогенераторе общим объемом  $1 \text{ м}^3$  наблюдается для сетчатого сополимера полиметилметакрилата — порядка 20 000 МДж/м<sup>3</sup> в сочетании с любым рассмотренным типом топлива. Максимальное значение теплоты сгорания получено для сшитого полистирола — порядка 30 000 ÷ 31 000 МДж/м<sup>3</sup> в сочетании с любым рассмотренным типом топлива. Таким образом, с точки зрения энергетических характеристик эти составы являются оптимальными из всех рассмотренных.

Уменьшение пористости твердого горючего приводит к линейному увеличению объемной доли топлива и суммарной теплоты сгорания твердого горючего. Однако уменьшить пористость твердого горючего до нуля невозможно, так как необходимо поровое пространство для фильтрации через него горячих газов при сгорании твердого топлива.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Яновский Л. С., Байков А. В., Аверьков И. С. Оценка возможности создания ВРД на твердом топливе с системой активного охлаждения // Тепловые процессы в технике. — 2016. — Т. 8, № 3. — С. 111–116.
2. Кондратюк Е. Л. Исследования, проводимые в США, в области создания гиперзвуковых летательных аппаратов // Двигатель. — 2013. — Т. 85, № 1. — С. 8–11.
3. Шандаков В. А., Жарков А. С., Стрельников В. Н., Пилюгин Л. А., Савельева Е. В. Физико-химические основы создания элементов снаряжения низкотемпературных газогенераторов различного назначения. — М.: Физматлит, 2011.
4. Калинин С. В., Шабунин А. И., Сарабьев В. И., Валяев В. А., Хрисанфов М. В., Егорова А. С. Исследование термодинамических характеристик протехнических газогенерирующих составов для низкотемпературных газогенераторов // Вестн. Технолог. ун-та. — 2017. — Т. 20, № 2. — С. 44–46.
5. Арефьев К. Ю., Федотова К. В., Яновский Л. С., Аверьков И. С., Байков А. В. Исследование системы охлаждения цилиндрических каналов продуктами газификации твер-

- дых углеводородных горючих // Изв. вузов. Машиностроение. — 2017. — № 1. — С. 86–98.
6. **Федотова К. В., Арефьев К. Ю., Сухов А. В., Яновский Л. С.** Исследование процессов смешения продуктов газификации твердых углеводородов с высокоэнтальпийным газовым потоком в каналах постоянного сечения // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. — 2017. — № 4. — С. 11–27.
  7. **Курзинер Р. И.** Реактивные двигатели для больших сверхзвуковых скоростей полета. — М.: Машиностроение, 1989.
  8. **Байков А. В., Пешкова А. В., Шиховцев А. В., Яновский Л. С.** Экспериментальные исследования низкотемпературного твердотопливного газогенератора для воздушно-реактивного двигателя // Горение и взрыв. — 2016. — Т. 9, № 4. — С. 126–131.
  9. **Салганский Е. А., Кислов В. М., Глазов С. В., Жолудев А. Ф., Манелис Г. Б.** Особенности фильтрационного горения пиролизующегося твердого топлива // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 5. — С. 42–47.
  10. **Глазов С. В., Салганский Е. А., Кислов В. М., Салганская М. В., Жолудев А. Ф.** Перестройка структуры волны фильтрационного горения при смене состава топлива // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 3. — С. 52–58.
  11. **Салганский Е. А., Фурсов В. П., Глазов С. В., Салганская М. В., Манелис Г. Б.** Модель воздушной газификации твердого горючего в фильтрационном режиме // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 1. — С. 44–50.
  12. **Trusov V. G.** Program system TERRA for simulation phase and thermal chemical equilibrium // Proc. of the XIV Int. Symp. on Chemical Thermodynamics. — St-Petersburg, 2002. — P. 483–484.
  13. **Polymer Handbook.** Fourth ed. / J. Brandrup, E. H. Immergut, E. A. Grulke, A. Abe, D. R. Bloch (Eds). — Wiley, 1998.
  14. **Трушляков В. И., Лемперт Д. Б., Белькова М. Е.** Исследование возможности использования газогенерирующих составов для повышения эффективности жидкостных ракет // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 3. — С. 48–54.

*Поступила в редакцию 28.06.2018.*

*После доработки 10.09.2018.*

*Принята к публикации 12.09.2018.*

---