

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРА, УПРАВЛЯЕМОГО ПОДАЧЕЙ ГАЗООБРАЗНОГО ОКИСЛИТЕЛЯ

Д. А. Внучков, В. И. Звегинцев, Д. Г. Наливайченко, С. И. Шпак

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск  
zvegin@itam.nsc.ru

Выполнена экспериментальная проверка возможности реализации схемы газогенератора, в котором процесс тепловыделения регулируется подачей газообразного окислителя. В качестве горючего использовались газообразный водород, жидкий бензин и твердый уротропин (сухой спирт). Показано, что при горении различных видов горючего работа газогенератора предлагаемой схемы является устойчивой, давление в камере сгорания газогенератора не превышает давление подачи окислителя и четко соотносится с изменением расхода окислителя. Расчеты по квазистационарной модели позволили определить все параметры процесса, включая те, которые не измерялись в эксперименте. В частности, установлено, что температура продуктов сгорания составляет  $600 \div 1900$  К, а из газогенератора выходит высокотемпературная смесь, содержащая непрореагировавшее горючее (коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 0.55 \div 2.30$ ).

Ключевые слова: газогенератор, газообразный окислитель, управление горением, эксперимент, расчет по квазистационарной модели.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рабочий процесс газогенератора, как правило, представляет собой горение твердотопливных композиций в ограниченном объеме камеры сгорания с выходом продуктов сгорания через сопло постоянного или переменного сечения (рис. 1). Расход горючего  $G_2$  и расход истекающих продуктов сгорания  $G_3$  по-разному зависят от температуры и давления внутри газогенератора и в общем случае не равны друг другу. Именно из-за изменения давления и нарушения баланса расходов на входе и выходе работа газогенераторов является в принципе нестабильной и неустойчивой. В [1–5] описаны различные способы управления и стабилизации рабочих параметров внутри высокоэнергетических газогенераторов, которые сводятся в основном к регулированию скорости горения, площади горения или площади выходного сопла.

В данной работе исследовалась возможность получения устойчивого и управляемого горения внутри газогенератора за счет подачи газообразного окислителя с постоянным или регулируемым давлением от внешнего источника (см. рис. 1). Предполагалось, что в

этой схеме изменение давления в газогенераторе приведет к изменению перепада давления между камерой сгорания и источником подачи окислителя. Соответственно, изменится расход окислителя  $G_1$  и интенсивность тепловыделения, а процесс горения станет устойчивым.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Газогенератор, разработанный для проведения рассматриваемых экспериментов, был выполнен в виде вертикального цилиндра с внутренним диаметром 26 мм и длиной 60 мм. Верхняя часть цилиндра заглушена резьбовой пробкой, по центру которой установлена све-

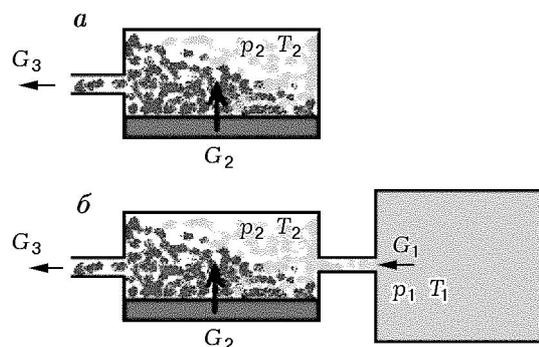


Рис. 1. Общая схема газогенератора (а) и схема газогенератора с регулируемой подачей газообразного окислителя (б)

Данная работа выполнена при поддержке интеграционного проекта СО РАН № 103 и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-08-00311).

ча зажигания. Через дно газогенератора проходит трубка диаметром 4 мм для подачи окислителя. Такая конструкция газогенератора позволила провести исследование с горением горючих веществ различного агрегатного состояния: твердого (уротропин), жидкого (бензин) и газообразного (водород).

Эксперименты проводились на установке, схема которой показана на рис. 2. Установка содержит исследуемый газогенератор, систему подачи окислителя, систему подачи газообразного топлива, блок электропитания и систему регистрации измеряемых параметров. Окислитель (воздух) подавался из баллона объемом  $6.5 \text{ дм}^3$  через редуктор (или без него) и электропневмоклапан. За счет использования редуктора давление подачи окислителя поддерживалось в процессе испытания практически постоянным. В ряде экспериментов редуктор не использовался, и тогда давление окислителя в процессе испытания плавно уменьшалось в соответствии с законом адиабатического истечения из сосуда постоянного объема. В опытах с горением газообразного горючего подача водорода осуществлялась из баллона объемом  $2 \text{ дм}^3$  через редуктор и электропневмоклапан по трубке через сопло в стенке газогенератора. За счет использования редуктора давление подачи топлива поддерживалось в процессе ис-

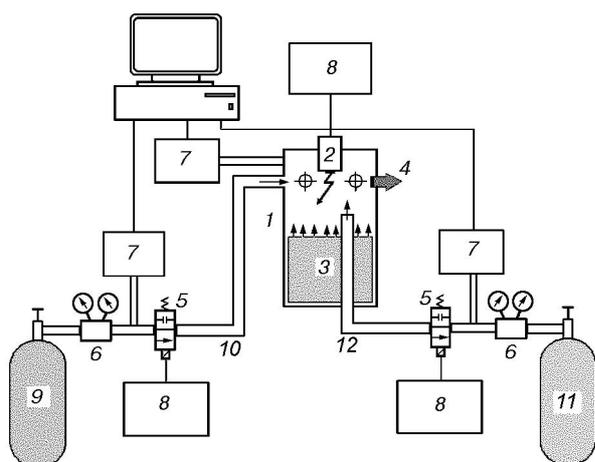


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — газогенератор, 2 — свеча зажигания, 3 — жидкое или твердое горючее, 4 — выход продуктов сгорания, 5 — электромагнитный клапан, 6 — газовый редуктор, 7 — датчик давления, 8 — подача напряжения (24 В), 9 — баллон с водородом ( $2 \text{ дм}^3$ ), 10 — подача водорода, 11 — баллон со сжатым воздухом ( $6.5 \text{ дм}^3$ ), 12 — подача воздуха

пытания практически постоянным.

Для воспламенения горючей смеси в газогенераторе использовалась автомобильная свеча.

Манометры, установленные на баллонах с водородом и воздухом, позволяли контролировать давление и массу газа в баллоне до и после выполнения эксперимента. Температура газа в баллонах перед началом эксперимента равнялась комнатной. В ходе эксперимента регистрировались:  $p_1$  — давление в баллоне с воздухом,  $p_2$  — давление в баллоне с водородом,  $p_3$  — давление за редуктором в воздушной трассе,  $p_4$  — давление за редуктором в топливной трассе,  $p_5$  — давление в газогенераторе. Измерения проводились тензометрическими датчиками давления ТДМ-2А, показания которых записывались через 2 мс с помощью многоканальной измерительно-регистрающей системы. Погрешность измерения давлений оценивалась по результатам статической калибровки и составляла 1 %.

При проведении экспериментов с газообразным горючим вначале осуществлялась подача окислителя, затем водорода, после чего смесь в газогенераторе воспламенялась свечой зажигания. Продукты сгорания истекали через сопла. В различных опытах использовалось от 1 до 5 выходных сопел. Редукторы поддерживали постоянное давление окислителя и газообразного горючего в диапазоне  $0.2 \div 0.7 \text{ МПа}$ . Расходы окислителя и газообразного горючего рассчитывались по газодинамическим соотношениям, при этом сечения подводящих трубопроводов определялись в предварительных тарировочных опытах. После окончания эксперимента прежде всего отключалась подача водорода, затем подача воздуха и после этого оставалась регистрация измеряемых давлений.

Жидкое горючее заливалось перед экспериментом на дно газогенератора. В процессе эксперимента происходило испарение и смешение горючего с окислителем, после чего образовывалась горючая смесь воспламенялась свечой зажигания и горела до полного выгорания.

В экспериментах с твердым горючим уротропин укладывался на дно газогенератора небольшими кусочками размером  $2 \div 5 \text{ мм}$ . Это обеспечивало хорошую перфорацию и достаточную большую площадь контакта горючего с окислителем. Для надежного воспламенения и быстрого выхода на стационарный ре-

жим горения перед включением свечи зажигания в газогенератор подавалась небольшая порция водорода. Продолжительность процесса горения определялась временем подачи окислителя в газогенератор или полным выгоранием уротропина. Масса сгоревшего горючего определялась взвешиванием его до и после эксперимента. Массовый секундный расход твердого горючего определялся путем деления разницы исходной массы горючего и его остатка на время горения в конкретном эксперименте.

### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Эксперименты сопровождалась расчетами нестационарного процесса изменения давления и температуры в газогенераторе, определяемого законами подачи топлива и окислителя, тепловыделением в камере сгорания и истечением продуктов сгорания из нее. Расчетная схема представлена на рис. 1. Окислитель и горючее подаются в камеру сгорания, а продукты сгорания выбрасываются в атмосферу. Геометрия всех емкостей и начальные параметры в них (давления и температуры) заданы. В качестве окислителя взят газообразный воздух. В зависимости от вида горючего использовались три варианта задачи.

#### Горение газообразного горючего

Газообразное горючее поступает в газогенератор из отдельной емкости. Процесс истечения для совершенного газа из емкостей с окислителем и горючим через внезапно открытое сопло описывается следующими уравнениями [6, 7]:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V}(-Gi), \quad (1)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{V}(-G), \quad (2)$$

$$T = \frac{p}{R\rho}. \quad (3)$$

Здесь  $p$  — давление,  $T$  — температура,  $\rho$  — плотность,  $V$  — объем,  $G$  — массовый расход,  $i$  — энтальпия,  $R$  — газовая постоянная,  $\gamma = 1.4$  — показатель адиабаты.

Текущие значения расхода вычисляются по соотношениям

$$G = \frac{\mu F m p_h \cdot \sigma}{\sqrt{T_h}}. \quad (4)$$

Здесь  $\mu$  — коэффициент расхода,  $F$  — площадь выходного сопла,

$$\sigma = \begin{cases} 1, & b \leq b_{cr} \\ \sqrt{b^{k_2} - b^{k_3}}, & b > b_{cr} \end{cases}, \quad b = \frac{p_b}{p_h},$$

индексом  $h$  обозначено большее из давлений (внутри емкости или вне ее), индексом  $b$  — меньшее,

$$k_2 = 2/\gamma, \quad k_3 = (\gamma + 1)/\gamma,$$

$$m = \begin{cases} \sqrt{2\gamma/(\gamma - 1)R}, & b \leq b_{cr}, \\ \sqrt{\gamma/R(2/(\gamma + 1))^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}, & b > b_{cr}. \end{cases}$$

Для камеры сгорания уравнения (1) и (2) принимают следующий вид:

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V_2} \left( \frac{dQ}{dt} - G_3 i_3 + G_1 i_1 + G_2 i_2 \right), \quad (5)$$

$$\frac{d\rho_2}{dt} = \frac{1}{V_2} (-G_3 + G_1 + G_2). \quad (6)$$

Здесь цифра в индексе означает принадлежность к соответствующей емкости (см. рис. 1), а  $dQ/dt$  связано с горением и вычисляется по формуле

$$\frac{dQ}{dt} = H_u G_2 f_\alpha, \quad (7)$$

где  $H_u$  — теплотворная способность топлива,  $f_\alpha$  — модельная функция, отражающая количество горючего, вступившего в процесс горения,

$$f_\alpha = \begin{cases} \alpha & \text{при } 0 \leq \alpha \leq 1, \\ 1 & \text{при } \alpha > 1, \end{cases} \quad (8)$$

$\alpha = G_1/G_2 L_0$ ,  $L_0$  — стехиометрическое соотношение, показывающее количество окислителя, необходимое для полного сгорания 1 кг горючего.

Эффективные значения проходных сечений  $\mu F$  для подачи воздуха и водорода на выходе из газогенератора определялись в отдельных калибровочных экспериментах. Погрешность вычисления расхода газообразных компонентов с использованием калибровочных данных не превышала  $3 \div 4$  %.

### Горение жидкого горючего

По условиям экспериментов рассматривался вариант, когда жидкое топливо находится внутри камеры сгорания газогенератора. В этом случае уравнения (1)–(3) для емкости с окислителем не меняются, а для камеры сгорания газогенератора получаем:

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V_2} \left( \frac{dQ}{dt} - G_3 i_3 + G_1 i_1 + G_2 i_2 - p_2 \frac{dV_2}{dt} \right), \quad (9)$$

$$\frac{d\rho_2}{dt} = \frac{1}{V_2} \left( -G_3 + G_1 + G_2 + \frac{dV_2}{dt} \rho_2 \right). \quad (10)$$

В последние уравнения добавлены члены, учитывающие изменение объема камеры сгорания по мере уноса горючего (из-за горения и/или испарения):

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{G_2}{\rho_2}. \quad (11)$$

Расход жидкого горючего в данном случае принимался постоянным по времени,  $G_2 = \text{const}$ .

### Горение твердого горючего

Расчет проводился аналогично варианту для жидкого горючего, только объем камеры сгорания принимался постоянным, так как объем горючего составлял менее 10 % объема камеры. В модельных расчетах расход горючего определялся по формуле

$$G_2 = G_0 \left( \frac{p_2}{p_{20}} \right)^\nu, \quad (12)$$

где  $G_0$  — начальный расход горючего,  $\nu$  — показатель степени функции учета зависимости скорости горения горючего от давления в камере сгорания. Запись в виде (12) при  $\nu > 0$  соответствует степенному закону скорости горения твердого горючего (см., например, [2]):

$$G_2 = \rho S U_0 \left( \frac{p_2}{p_{20}} \right)^\nu. \quad (13)$$

Здесь  $S$  — площадь поверхности горения горючего,  $U_0$  — скорость горения горючего при давлении  $p_{20}$ .

Математическое моделирование с использованием приведенных уравнений позволило исследовать характеристики переходных процессов в газогенераторах различных конструкций в широком диапазоне определяющих параметров. В большинстве случаев работа газогенераторов, регулируемых по предлагаемому способу, оказывалась устойчивой.

Описанная выше схема квазистационарного расчета использовалась также при обработке экспериментальных результатов. Расчеты проводились для характерных моментов времени каждого опыта. При этом величина реализованной теплотворной способности топлива (или коэффициент полноты выгорания) изменялась и использовалась в качестве параметра до получения максимального согласования результатов расчета с измерениями давления в камере газогенератора. Потери тепла в стенки газогенератора не учитывались. Результаты измерений и соответствующих расчетов для фиксированных моментов времени при горении исследуемых веществ приведены в таблице. Следует отметить, что представленные данные типичны для выполненной серии (около 250) экспериментов.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### Эксперименты с горением водорода

В основной серии экспериментов с горением водорода давление подаваемого воздуха (окислителя) и давление водорода поддерживались постоянными в течение опыта. В качестве типичных экспериментов из этой серии рассматриваются опыты 1–7.

На рис. 3 представлены результаты измерения давлений в опытах 3, 7 и 2. В опытах менялось количество сопел для выхода продуктов сгорания из газогенератора. Соответственно изменялось давление продуктов сгорания в газогенераторе.

В опыте 3 было открыто всего лишь одно сопло на выходе из газогенератора. Давление подачи воздуха составляло 0.55 МПа. При горении водорода давление в газогенераторе повышалось до 0.5 МПа. Согласование расчетных и экспериментальных данных по давлению в газогенераторе получено при величине теплотворной способности 45 МДж/кг (37.5 % от теоретического значения 120 МДж/кг при

Характерные параметры рабочего процесса газогенератора

Номер опыта	Горючее	Время, с	Давление подачи воздуха, МПа	Расход, г/с		Характеристики процесса			Доля прореагировавшего воздуха, %	Доля сгоревшего горючего, %	$\alpha$
				воздуха	горючего	тепловыделение, МДж/кг	давление, МПа	температура, К			
1	Водород	20.0	0.48	1.60	0.073	55.0	0.22	1900	72.1	45.8	0.33
2		19.0	0.52	1.66	0.064	30.0	0.41	1200	33.2	25.0	0.67
3		10.0	0.55	1.17	0.043	45.0	0.52	1596	47.3	37.5	0.67
4		10.5	0.54	1.94	0.066	30.0	0.43	1229	29.3	25.0	0.80
5		10.5	0.51	2.01	0.068	30.0	0.34	1236	29.2	25.0	0.81
6		10.5	0.51	2.03	0.068	25.0	0.28	1101	24.1	20.8	0.83
7		10.5	0.51	1.98	0.068	30.0	0.22	1243	29.6	25.0	0.79
8	Бензин	40.0	0.77	0.83	0.073	11.2	0.65	852	32.7	44.3	1.63
9		40.0	0.59	0.63	0.046	13.0	0.48	810	28.7	48.6	2.34
10		30.0	0.44	0.47	0.037	8.5	0.36	632	23.0	37.8	2.04
11		40.0	0.31	0.33	0.030	7.0	0.24	611	23.4	34.3	1.71
12	Уротропин	40.0	0.26	1.03	0.128	4.0	0.15	778	14.7	13.3	0.89
13		40.0	0.26	0.91	0.114	5.0	0.20	905	18.7	16.6	0.87
14		40.0	0.30	0.68	0.128	3.0	0.27	741	16.7	10.0	0.55

полном сгорании подаваемого водорода). Расчетные оценки показывают, что малый перепад давления привел к существенному уменьшению расхода воздуха (до 1.17 вместо 2.0 г/с перед воспламенением водорода). Как и ожидалось, уменьшение расхода окислителя не позволило давлению в газогенераторе при горении превысить давление подачи окислителя. Температура продуктов сгорания достигала 1600 К. В данном опыте сгорало до 37.5 % горючего. Уменьшение расхода воздуха привело к обогащению выходящих продуктов сгорания несгоревшим водородом (коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 0.67$ ).

В опыте 4 (см. таблицу) было открыто два выходных сопла. Вследствие этого давление в газогенераторе при горении не превышало 0.43 МПа, тогда как давление подачи воздуха составляло 0.54 МПа. Повышение давления при горении в газогенераторе не привело к заметному уменьшению расхода окислителя (1.94 вместо 2.1 г/с перед воспламенением).

При дальнейшем увеличении количества выходных сопел из газогенератора в опытах 5–7 (3, 4 и 5 сопел соответственно) давление в газогенераторе оставалось примерно посто-

янным, не превышая 0.35 МПа, и не влияло на расход окислителя. В опытах 4–7 сгорало 21 ÷ 25 % поступающего водорода, температура продуктов сгорания составляла 1100 ÷ 1200 К. В продуктах сгорания на выходе из газогенератора оставалось достаточно большое количество несгоревшей водородно-воздушной смеси с увеличенным содержанием водорода ( $\alpha = 0.8$ ).

В опытах 1 и 2 подача окислителя производилась непосредственно из баллона (без редуктора). При этом давление и расход окислителя непрерывно уменьшались по времени эксперимента, в то время как давление и расход подаваемого водорода поддерживались постоянными. Результаты измерений для опыта 2 показаны на рис. 3, в. В опыте 1 продукты сгорания выходили из газогенератора через пять сопел, а в опыте 2 — через два сопла. Из рис. 3, в видно, что в опыте 2 после включения свечи происходит воспламенение водорода и давление в газогенераторе при горении повышается до 0.55 МПа. Уменьшение площади выходных сопел примерно в 6 раз (по сравнению с опытом 1) привело к росту давления в газогенераторе примерно в 1.8 раза. В обоих опытах дав-

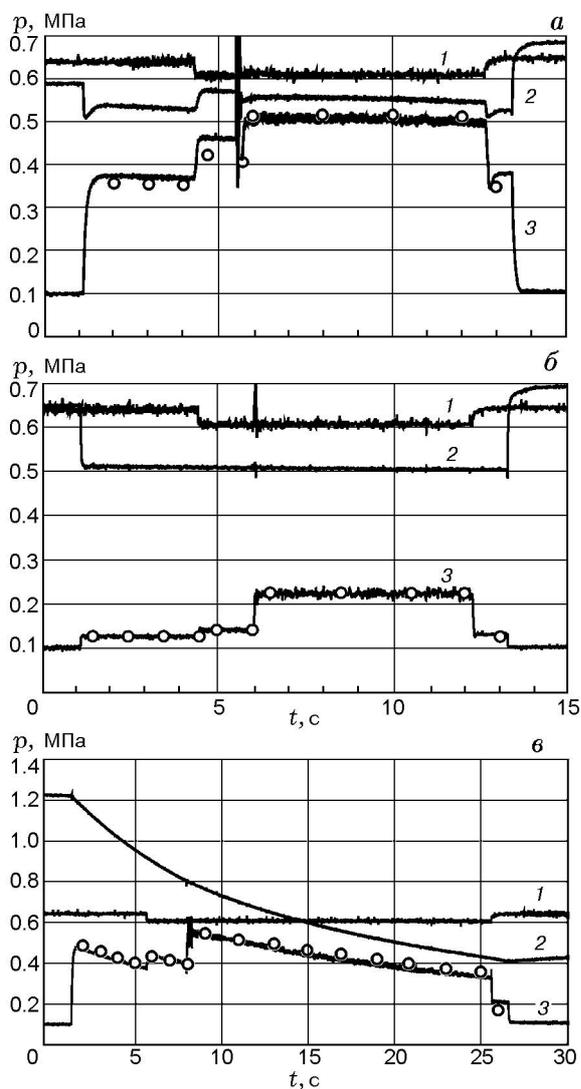


Рис. 3. Результаты экспериментов с горением газообразного горючего:

1 — давление водорода, 2 — давление окислителя, 3 — давление в газогенераторе, точки — расчет

ление в газогенераторе уменьшается по времени режима в соответствии с уменьшением давления подаваемого окислителя.

Согласование результатов для опыта 1 (см. таблицу) получено при величине теплотворной способности  $45 \div 55$  МДж/кг ( $37 \div 46$  % от теоретического значения 120 МДж/кг). Температура продуктов сгорания увеличивается по времени режима от 1 600 до 1 900 К. При этом доля сгоревшего водорода остается примерно постоянной ( $37 \div 46$  % от исходного количества), а доля прореагировавшего воздуха увеличивается от 38 до 78 %. Коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания уменьша-

ется от 1.0 до 0.24.

В опыте 2 (с меньшим количеством выходных сопел из газогенератора) согласование по давлению в газогенераторе получено при величине теплотворной способности  $30 \div 40$  МДж/кг ( $25 \div 33$  % от теоретического значения). Температура продуктов сгорания по времени режима увеличивается от 1 010 до 1 350 К. Доля сгоревшего водорода составляет  $25 \div 30$  % от исходного количества, а доля прореагировавшего воздуха увеличивается от 18 до 51 %. Коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания уменьшается от 2.3 до 0.40.

### Эксперименты с горением бензина

В основной серии экспериментов давление подаваемого воздуха поддерживалось (с помощью редуктора) постоянным по времени. Перед экспериментом в газогенератор заливалось  $5 \text{ см}^3$  бензина (3.5 г). Время горения определялось по измерениям давления в газогенераторе, а массовый расход горючего предполагался постоянным.

На рис. 4 показаны результаты измерения давления для опыта 8 с горением бензина. В начале каждого опыта сочетание объемов баллона с окислителем и газогенератора, а также проходных сечений трубопроводов между ними создавало определенный расход окислителя через газогенератор, который изменялся пропорционально давлению окислителя (так же, как в опытах без горения). Через некоторое время включалась поджигающая свеча, и начиналось горение паров бензина в газогенераторе. В этот

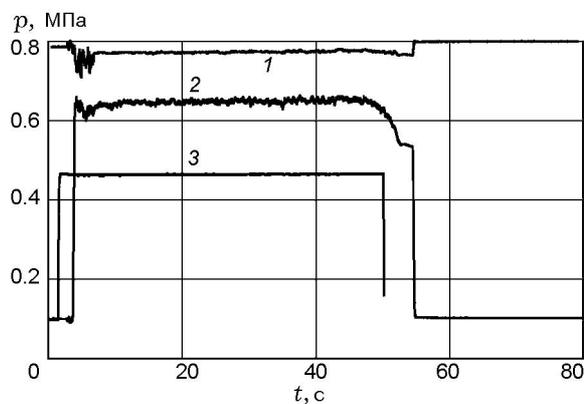


Рис. 4. Результаты экспериментов с горением жидкого горючего:

1 — давление окислителя, 2 — давление в газогенераторе при горении, 3 — без горения

момент давление внутри газогенератора увеличивалось, перепад давлений окислителя и продуктов сгорания уменьшался, что приводило к уменьшению расхода окислителя, поступающего в газогенератор. Тепловыделение и давление в газогенераторе стабилизировались на уровне, соответствующем расходу окислителя. Увеличение тепловыделения привело бы к повышению давления в газогенераторе и, следовательно, к уменьшению расхода окислителя. С другой стороны, уменьшение тепловыделения вызвало бы увеличение расхода и интенсификацию процесса горения.

Математическая модель позволяла путем варьирования величины выделяющегося при горении тепла согласовать расчетное давление в газогенераторе с экспериментально измеряемым значением. Результаты обработки, приведенные в таблице, показывают, что в рассматриваемых опытах давление в газогенераторе всегда было на  $15 \div 20$  % меньше давления подаваемого окислителя. Реальное тепловыделение составляло  $34.3 \div 48.6$  % от возможного значения  $41.9$  МДж/кг при полном сгорании бензина. Если предположить, что сгоревшие доли горючего и окислителя находятся в стехиометрическом соотношении, то внутри газогенератора сгорает  $34.3 \div 48.6$  % горючего. Расчеты показывают, что температура продуктов сгорания внутри газогенератора составляет  $852 \div 611$  К.

Таким образом, из выходных сопел газогенератора, наряду с продуктами полного сгорания, выходит перемешанная и нагретая горючая смесь с коэффициентом избытка воздуха  $1.6 \div 2.3$ , в которой содержится  $51.4 \div 65.7$  % подаваемого горючего.

Следует отметить наличие окислителя (кислорода воздуха) в выходящих из газогенератора продуктах сгорания. Если процесс горения внутри газогенератора полностью контролируется наличием или отсутствием окислителя, то в выходящих продуктах сгорания не должно быть окислителя или, по крайней мере, выходящая горючая смесь должна иметь избыток топлива. Очевидно, что в рассматриваемой модельной конструкции газогенератора не происходит полного перемешивания горючего и окислителя, поэтому часть окислителя проходит транзитом через камеру сгорания, не участвуя в процессе горения.

### Эксперименты с горением твердого топлива

В данных экспериментах подача окислителя производилась из баллона через редуктор. При этом давление и расход окислителя поддерживались постоянными. При обработке результатов с использованием приведенной выше математической модели расход топлива также предполагался постоянным по времени.

В опытах изменялось количество сопел для выхода продуктов сгорания из газогенератора (от 1 до 3 сопел). В опыте 12 (рис. 5) были открыты три сопла на выходе из газогенератора. Давление подачи окислителя составляло  $0.26$  МПа. Давление в газогенераторе при горении не превышало  $0.16$  МПа. Из-за большого перепада давлений расход воздуха практически не менялся при горении и равнялся  $1.03$  г/с по сравнению с  $1.05$  г/с до воспламенения. Согласование расчетных и экспериментальных данных по давлению в газогенераторе получено при теплотворной способности  $4$  МДж/кг ( $13$  % от теоретического значения  $30$  МДж/кг при полном сгорании уротропина). Температура продуктов сгорания составляла  $778$  К. В продуктах сгорания на выходе из газогенератора оставалась достаточно большое количество топливной смеси ( $\alpha = 0.89$ ), способной к дальнейшему горению.

В опыте 13 были открыты два сопла на выходе из газогенератора. Давление подачи окислителя составляло  $0.26$  МПа. Давление в газогенераторе при горении поднималось до  $0.2$  МПа. Расход воздуха при горении изме-

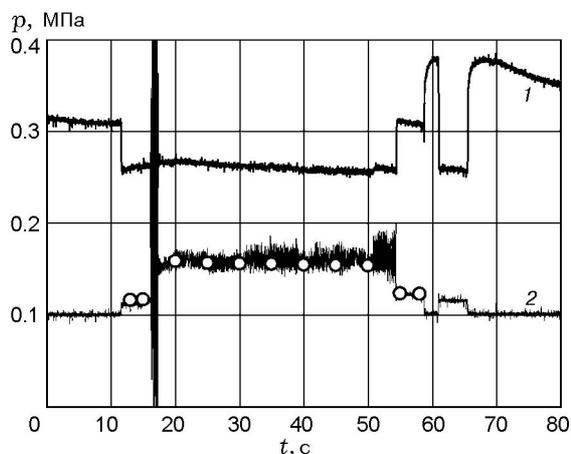


Рис. 5. Результаты экспериментов с горением твердого горючего:

1 — давление окислителя, 2 — давление в газогенераторе, точки — расчет

нялся незначительно: 0.91 вместо 0.98 г/с до воспламенения. Температура продуктов сгорания составляла 905 К. В газогенераторе сгорало 17 % используемого уротропина. В продуктах сгорания на выходе из газогенератора оставалось достаточно большое количество топливной смеси ( $\alpha = 0.87$ ), способной к дальнейшему горению.

В опыте 14 было открыто одно сопло на выходе из газогенератора. Давление подачи окислителя составляло 0.30 МПа. Давление в газогенераторе при горении достигало 0.27 МПа. Вследствие малого перепада давления расход воздуха при горении уменьшился до 0.68 г/с по сравнению с 0.96 г/с перед воспламенением. Температура продуктов сгорания составила 741 К. В газогенераторе сгорало 10 % используемого уротропина. В продуктах сгорания на выходе из газогенератора оставалась достаточно большое количество топливной смеси ( $\alpha = 0.55$ ), способной к дальнейшему горению.

Таким образом, в работе показана возможность реализации схемы газогенератора, при которой процесс тепловыделения регулируется подачей газообразного окислителя. При использовании различных видов горючего (газообразный водород, жидкий бензин и твердый уротропин) тепловыделение в газогенераторе предлагаемой схемы является устойчи-

вым, давление в камере сгорания газогенератора не превышает давление подачи окислителя и четко отслеживает изменение расхода окислителя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Управляемые** энергетические установки на твердом ракетном топливе / Под ред. М. И. Соколовского, В. И. Петренко. М.: Машиностроение, 2003.
2. **Шишков А. А., Румянцев Б. В.** Газогенераторы ракетных систем. М.: Машиностроение, 1981.
3. **Орлов Б. В., Мазинг Г. Ю., Рейдель А. Л., Степанов М. Н., Топчиев Ю. И.** Основы проектирования ракетно-прямоточных двигателей для беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1967.
4. **Соркин Р. Е.** Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе: внутренняя баллистика. М.: Наука, 1983.
5. **Головков Л. Г.** Гибридные ракетные двигатели. М.: Воениздат, 1976.
6. **Герц Е. В.** Расчет пневмоприводов. М.: Машиностроение, 1975.
7. **Беляев Н. М.** Термодинамика переменного количества газа. Днепропетровск: ДГУ, 1981.

*Поступила в редакцию 3/X 2007 г.,  
в окончательном варианте — 22/IV 2008 г.*