

# Контроль, испытания, эксплуатация

УДК 629.76.036.54

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ТВЕРДОТОПЛИВНОМ ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ С СОСТАВОМ НА ОСНОВЕ АЗИДА НАТРИЯ

С.Д. Ваулин, Я.Н. Малышева

Рассмотрен низкотемпературный твердотопливный газогенератор с составом на основе азидата натрия. Описана экспериментальная установка. Представлены результаты экспериментов. Приведены результаты обработки экспериментальных данных.

Объектом исследования является низкотемпературный твердотопливный газогенератор (НТГТ) и процессы, происходящие в нем. Данный газогенератор используется для наддува топливных баков. Его отличительной особенностью и преимуществом перед другими типами газогенератора является заряд с составом на основе азидата натрия. При горении такого заряда образуется инертный газ - азот с относительно низкой температурой (800-900 К), что дает возможность прямого наддува баков этим газом, без охлаждения. Схема НТГТ представлена на рис. 1.

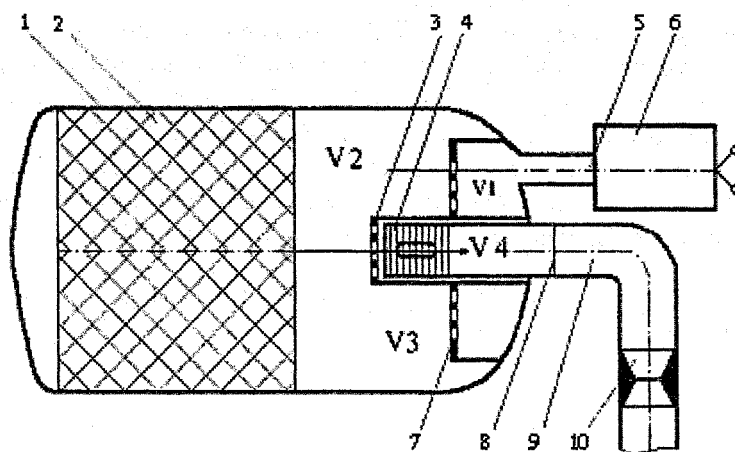


Рис. 1. Схема газогенератора: 1 – корпус ГГ; 2 – заряд азотосодержащего состава; 3 и 7 – расщепители; 4 – фильтр; 5 – подводящий патрубок; 6 – пиропатрон; 8 – мембрана; 9 – трубопровод; 10 – дроссельная шайба

Для отработки НТГТ, исследования происходящих процессов были проведены эксперименты. Упрощенная схема установки [1] представлена на рис. 2. Для испытаний были использованы штатные компоненты топлива АТ и НДМГ. В ходе экспериментов измерялись температуры и давления в газогенераторе (датчики ДД, ДТ1), в трубопроводе (датчики ДД2, ДТ2) и в баке с компонентом топлива (ДЦЗ, ДТЗ). В результате получены графики изменения во времени давлений и температур.

В НТГТ, как уже указывалось, находится заряд с составом на основе азидата натрия. При воздействии на этот состав горячих газов воспламенителя происходит разложение азидата натрия на торцевой поверхности заряда, представляющего собой насыпку таблеток, скрепленных специальным клеем. Продукты разложения проходят через дроссельную шайбу 3 (см. рис. 2). Далее газ движется по длинному (более двухсот калибров) не теплоизолированному трубопроводу, в котором в начальный момент времени происходит интенсивный теплообмен горячего газа с холодной

стенкой. Попадая через рассекатель в свободный объем наддуваемого бака, горячий газ расширяется, и его температура снижается.

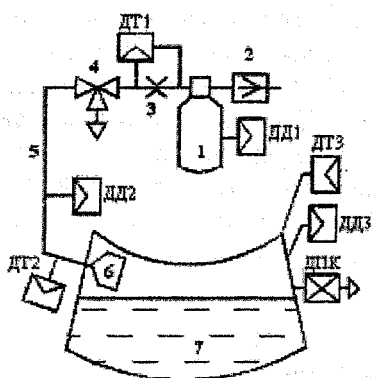


Рис. 2. Упрощенная схема экспериментальной установки системы наддува бака с компонентом топлива: 1 – низкотемпературный газогенератор; 2 – пиропатрон; 3 – дроссельная шайба; 4 – клапан переключения; 5 – трубопровод; 6 – рассекатель; 7 – наддуваемый бак; (ДД1 – датчик измерения давления в газогенераторе, ДТ1 – датчик измерения давления на выходе из газогенератора; ДД2 – датчик измерения давления на входе в бак; ДТ2 – датчик измерения температуры газов на входе в бак, ДТ3; ДД3 – датчики измерения температуры и давления в баке соответственно; ДПК – дренажно-предохранительный клапан

Результаты эксперимента по давлению представлены на рис. 3. Исследования давления осуществлялись датчиками давления ДДИ-20, ДДИ-21, температуры ТПО18-05, ТМ284, ТПИ10-05, ТМ221-01. Как видно из рис. 3 две кривые экспериментальных значений давления лежат очень близко друг к другу, а один эксперимент имеет несколько более низкие значения по давлению, но это нельзя считать выбросом и нельзя пренебрегать им из-за малого объема выборки.

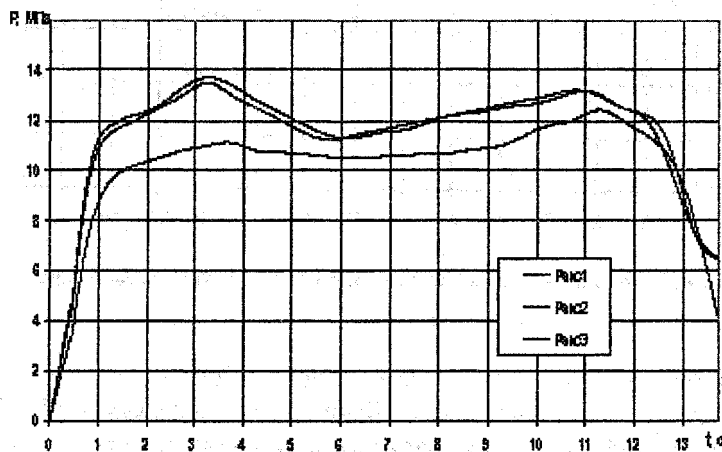


Рис. 3. Экспериментальные значения по давлению (по датчику ДД1)

Рассмотрим характер изменения давления во времени. На первых секундах работы газогенератора идет резкое увеличение давления, вследствие работы пиропатрона. Приблизительно на 0,4 с работы НТГТ рост давления еще более усиливается (увеличивается угол наклона кривой относительно оси времени), что соответствует началу разложения заряда. В первых двух экспериментах (верхние кривые) имеются пики по давлению, в третьем эксперименте пик менее выражен. По-видимому, наличие пика давления связано с возникновением волновых процессов при прорыве (вскрытии) мембраны. Значение верхней кривой в пике на 3,28 с имеет максимальное значение 13,7 МПа, средняя кривая имеет в пике максимум равный 13,5 МПа на 3,25 с, а нижняя кривая имеет значение давления равное 11,136 МПа на 3,6 с. Приблизительно после 1,2 с происходит выход НТГТ на стационарный режим работы, что характеризуется малым изменением давления. После 11,1 секунды начинается спад давления, что связано с догоранием заряда. После 12,5 с происходит резкий спад давления.

Экспериментальные данные по температуре представлены на рис. 4.

Как и для графиков изменения экспериментальных данных по давлению, для графиков изменения температуры характерно то, что значения двух экспериментов лежат близко друг к другу, а один из экспериментов имеет более низкие значения. Графики изменения температуры не имеют слишком резких подъемов и спадов. Это связано с инерционностью средств измерения температуры. Почти на всем протяжении работы НТТТ (до 13 с) идет плавный рост температуры. До 0,5 с идет незначительный рост температуры до значения 360 К, 367 К для двух верхних графиков и 296 К для нижнего графика - это время работы пиропатрона. Идет интенсивная потеря тепла газом на нагрев стенок, ТЗП и заряда. После 0,5 с начинается более резкий рост температуры, что связано с началом разложения заряда. Примерно после 4 с достигнув температуры 852 К и 850 К (для верхних графиков) и 748 (для нижнего) рост температуры становится совсем незначительным, что характеризуется выходом НТТТ на стационарный режим работы.

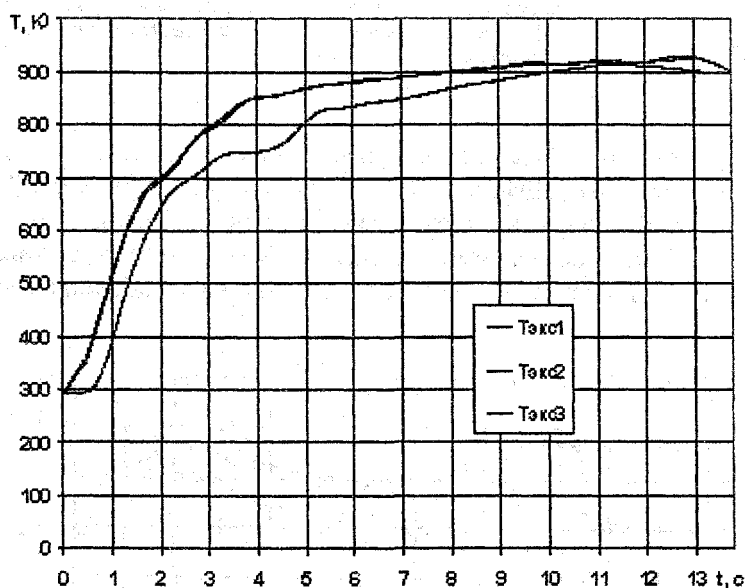


Рис. 4. Экспериментальные значения по температуре (по датчику ДТ1)

При экспериментальном исследовании какого-либо объекта производятся измерения физических величин и получают набор данных, требующий статистической обработки для исключения случайных погрешностей, построения зависимостей на основе найденных в результате обработки оценок неизвестных параметров и определения степени достоверности полученных результатов.

Для проверки соответствия полученных экспериментальных данных нормальному распределению существует множество методов. Задача состоит в том, чтобы выбрать наиболее подходящий для данного случая. Решение этой задачи на практике осложняется тем, что приходится обрабатывать выборки небольшого объема (3 точки в сечении, 30-50 точек во всей выборке). В связи с этим следует рассмотреть методы, которые позволяют получить результат в этих условиях.

Для оперативной оценки гипотезы нормальности распределения можно использовать следующие способы [2]:

при выборке количеством точек менее 120 проверка осуществляется с помощью среднего абсолютного отклонения (САО) по формуле

$$САО = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n},$$

где  $n$  - объем выборки;  $\bar{x}$  - среднее выборки.

Гипотеза нормальности распределения подтверждается, если

$$\left| \frac{САО}{S} - 0,7979 \right| < \frac{0,4}{\sqrt{n}},$$

$$\text{где } \bar{S} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}.$$

Быстрая проверка гипотезы нормальности распределения для выборки  $3 < n < 10000$  осуществляется с помощью размаха варьирования  $R$ . Из экспериментальных данных выбираются максимальная и минимальная величины и вычисляется размах варьирования данной выборки

$$R = |x_{\max} - x_{\min}|.$$

Затем вычисляется среднее значение в выборке и среднеквадратичное отклонение (СКО):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Гипотеза нормальности распределения подтверждается, если  $[R/S]_H < R/S < [R/S]_B$ , где нижнее и верхнее граничные значения берутся из таблицы, приведенной в [3, 4] в зависимости от величины выборки  $n$  и уровня значимости  $p$ :  $[R/S]_{H,B} = f(p, n)$ .

В случае выборки с  $n < 20$  для проверки гипотезы о нормальности распределения предлагается критерий, основанный на сравнении выборочных моментов (третьего и четвертого) с генеральными параметрами [3].

Для этого вычисляются оценки математического ожидания, дисперсии и среднеквадратичного отклонения:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2, \quad \sigma = \sqrt{\sigma^2}.$$

Выборочные коэффициенты эксцесса и асимметрии (третий и четвертый моменты) определяются по формулам

$$\gamma^*_1 = \frac{1}{n\sigma^3} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^3; \quad \gamma^*_2 = \frac{1}{n\sigma^4} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^4 - 3.$$

Распределения этих оценок сложны и мало изучены, обычно известны дисперсии этих величин

$$\sigma^2(\gamma^*_1) = \frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}, \quad \sigma^2(\gamma^*_2) = \frac{24(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}.$$

$$|\gamma^*_1| \leq 3\sqrt{\sigma^2(\gamma^*_1)}, \quad |\gamma^*_2| \leq 5\sqrt{\sigma^2(\gamma^*_2)}. \quad \text{считать нормальным при}$$

Если не соблюдается хотя бы один критерий, то распределение не соответствует нормальному.

Воспользуемся последним методом для проверки гипотезы о нормальности распределения. Критерий  $|\gamma^*_1| \leq 3\sqrt{\sigma^2(\gamma^*_1)}$  соблюдается, значит гипотеза нормальности распределения подтвердилась. Следовательно можно воспользоваться классической теорией.

Для обработки групп точек в сечениях необходимо вычислить математические ожидания, дисперсии и среднеквадратичные отклонения для каждой группы экспериментов. Затем для выборок одинакового объема  $f$  проводится проверка однородности полученных дисперсий.

Для проверки однородности по критерию Кохрена вычисляется

$$G = \frac{\sigma_{\max}^2}{\sum_{i=1}^l \sigma_i^2},$$

где  $l$  - число сечений (локальных выборок).

Число степеней свободы  $\nu = f - 1$ , объем всей выборки  $n$  и принятый уровень значимости дают возможность определить табличную квантиль  $G_{1-p}$ .

Так как условие  $G < G_{1-p}(n, \nu)$  соблюдается, то расхождения между дисперсиями можно считать случайными и можно провести осреднение дисперсий. После этой процедуры для выборок в сечениях можно строить доверительные интервалы. Для этого нужно задаться доверитель-

## Контроль, испытание, эксплуатация

ной вероятностью  $\beta = 1 - p$ . В общем виде доверительный интервал можно представить в следующем виде:

$$I_{\beta} = m \pm \varepsilon_{\beta}.$$

Соответственно доверительными границами (верхней и нижней) будут  $m_{В} = m + \varepsilon_{\beta}$ ,  $m_{Н} = m - \varepsilon_{\beta}$ .

$$\varepsilon_{\beta} = k_{\beta} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sigma u_{1-\frac{p}{2}}, \text{ пределения}$$

где  $u_{1-\frac{p}{2}}$  - квантиль стандартного нормального распределения, зависящая от уровня значимости  $p$ , т. е. в конечном счете от  $\beta$ .

Так как плотность распределения симметрично убывает относительно математического ожидания, можно воспользоваться формулой

$$\varepsilon_{\beta} = \pm 2,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

Таким образом, после обработки экспериментальных данных статистическими методами были определены: средний отклик, дисперсия, среднее квадратичное отклонение и доверительный интервал. Результаты статистической обработки экспериментальных данных по давлению и температуре в НТГГ приведены на рис. 5-8.

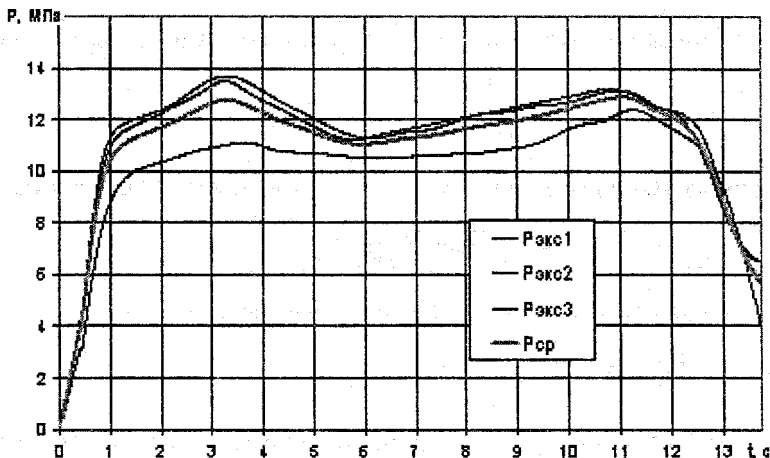


Рис. 5. Изменение давления в НТГГ (среднее арифметическое)

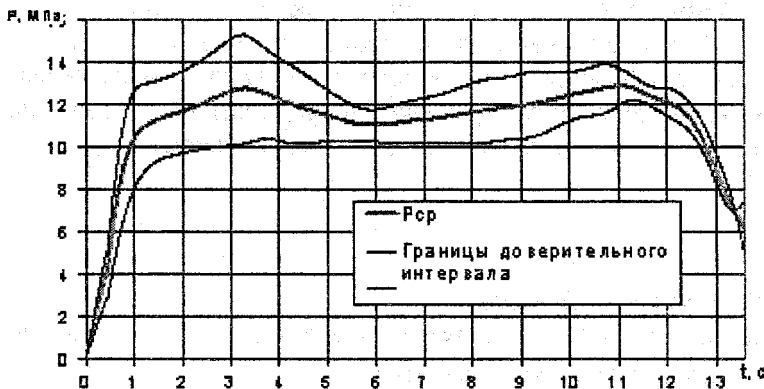


Рис. 6. Изменение давления в НТГГ (среднее арифметическое и доверительные интервалы)

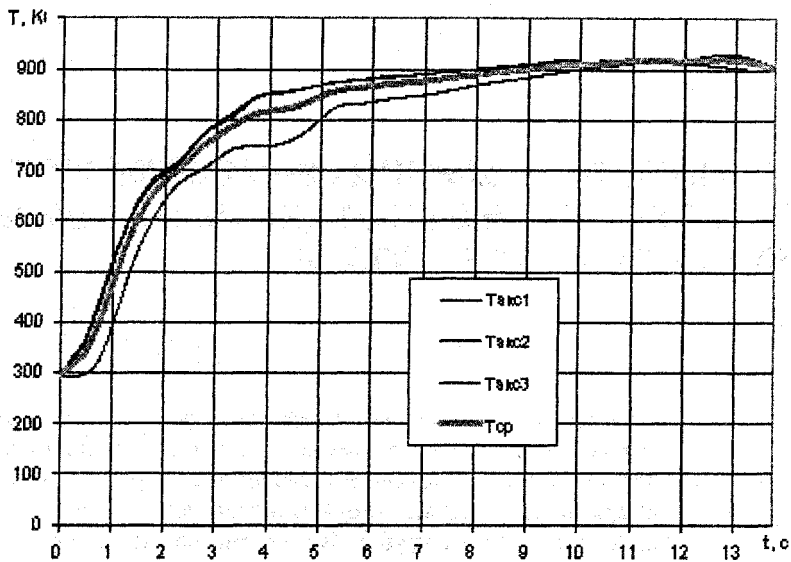


Рис. 7. Изменение температуры в НТГГ (среднее арифметическое)

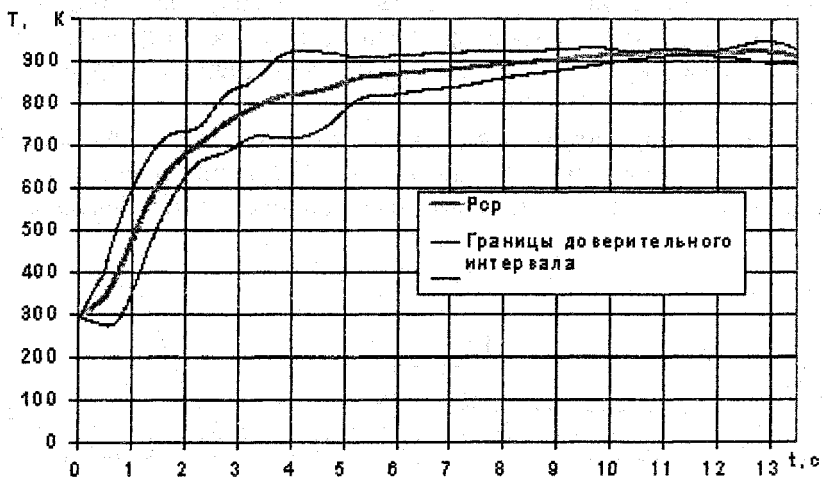


Рис. 8. Изменение температуры в НТГГ (среднее арифметическое и доверительные интервалы)

## Литература

1. Низкотемпературные твердотопливные газогенераторы: Методы расчета рабочих процессов, экспериментальные исследования / О.В. Валеева, С.Д. Ваулин, С.Т. Ковш, В.И. Феофилактов. - Миасс: Изд-во ГРЦ «КБ имени академика В.П. Макеева», 1997. - 268 с.
2. ЗаксЛотар. Статистическое оценивание. - М.: Статистика, 1976. - 218 с.
3. Боровков А.А. Математическая статистика. - М.: Наука, 1984. - 427 с.