

С. И. ПЛАНКОВСКИЙ, О. В. ШИПУЛЬ, О. В. ТРИФОНОВ, С. А. ЗАКЛИНСКИЙ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", Украина***АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ГЕНЕРАЦИИ СМЕСИ
ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ ТЕРМОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ**

Предметом исследования являются способы и устройства генерации газовых смесей с заданной точностью и высокой повторяемостью дозирования компонент. *Целью* статьи является разработка алгоритма управления системой генерации топливной смеси установки для прецизионной термоимпульсной обработки. В этой связи, в качестве *задач исследования* рассматриваются совершенствование метода критических отверстий применительно к задачам термоимпульсной обработки и разработка методики назначения параметров системы генерации смеси, обеспечивающих высокую точность и повторяемость дозирования её компонент и тепловых потоков при термоимпульсной обработке. Получены следующие *результаты*. Предложен метод динамического смесеобразования на основе метода критических отверстий, отличающийся тем, что в ходе наполнения камеры компоненты топливной смеси истекают из предварительно наполненных до заданного давления промежуточных ёмкостей регулируемого объёма без применения каких-либо регулирующих устройств. Разработана методика выбора диаметров критических отверстий, объёмов промежуточных ёмкостей и начального давления в них, обеспечивающая точность дозирования компонент на уровне порядка 0,01 %. Предложены технические решения, позволяющие стабилизировать величину тепловых потоков при термоимпульсной обработке с учетом динамики срабатывания клапанов системы генерации смеси и переменной температуры стенок камеры. Сформулированы следующие *выводы*. Предложен способ генерации топливных смесей для прецизионной термоимпульсной обработки на основе метода критических отверстий, отличающийся тем, что при смесеобразовании используется свободное истечение газов из предварительно наполненных промежуточных ёмкостей. Разработана методика расчета параметров генератора смеси на основе предложенного способа, позволяющая по заданному составу и давлению смеси при нормальной температуре определить соотношение площадей критических отверстий, объёмов ёмкостей, начального давления в них и времени наполнения камеры. Разработан алгоритм управления генерацией смеси для прецизионной термоимпульсной обработки. Показана необходимость управления скоростью открытия и закрытия клапанов подачи газов с учетом требуемого значения соотношения площадей критических отверстий. Для обеспечения стабильного значения тепловых потоков при циклической термоимпульсной обработке показана необходимость одновременного контроля массы заряда и давления в камере при подаче топливной смеси с последующей коррекцией времени обработки по рассчитанной начальной температуре топливной смеси.

Ключевые слова: прецизионная термоимпульсная обработка; генерация смеси газов; точность дозирования.

Введение

В работе [1] на основе параметров качества кромок, определяемых международным стандартом, сформулированы требования к точности дозирования компонент топливных смесей (0,1...0,5 %), применяемых при термоимпульсной отделке кромок высокоточных деталей. Для решения этой задачи было обосновано применение динамических методов генерации смесей, описанных в серии стандартов ISO 6145. Однако погрешность базового варианта наиболее точного из динамических методов генерации смесей, метода критических отверстий [2], составляет 0,5 %, т.е. находится на верхней границе требуемого для прецизионной термоимпульсной

обработки уровня точности.

Идея данного метода состоит в создании критического перепада давления на калиброванных (критических) отверстиях, через которых компоненты подаются в смеситель. При этом скорость течения газов становится равной скорости звука и постоянство давления и температуры на входе в критические отверстия автоматически обеспечивает постоянство массового расхода через них.

Однако выполнение этих условий связано с двумя принципиальными сложностями.

Во-первых, при подаче газов из баллонов высокого давления магистрали содержат различные устройства (фильтры, фитинги, элементы арматуры), имеющие различное гидравлическое сопротив-

ление и погрешности срабатывания. Это существенно затрудняет поддержание постоянства давления перед критическими отверстиями.

Во-вторых, газы, имеющие различные свойства, при расширении в ходе истечения из баллонов по-разному меняют свою температуру, что требует применения дополнительных устройств для её поддержания на заданном уровне перед критическими отверстиями.

Наиболее очевидным путем повышения точности метода критических отверстий является применение в магистралях подачи компонент высокоточных регуляторов с каналами обратной связи.

Так, например, в более современных вариантах метода совместное применение высокоточных регуляторов в сочетании с предварительной калибровкой магистрали при помощи расходомеров позволило повысить точность дозирования компонент до 0,1 % [3, 4]. Такие решения чаще всего применяются для задач аналитической химии при генерации смесей с высокой степенью разбавления, поскольку требуют использования достаточно дорогих устройств [5].

В этой связи задача повышения точности динамической генерации смесей без необходимости использования сложных регулирующих устройств является актуальной. Перспективным способом её решения является применение модификации метода критических отверстий, использующей закономерности закритического истечения газов из сосудов постоянного объёма [6].

Целью настоящей работы является разработка алгоритма управления системой генерации топливной смеси для прецизионной термоимпульсной обработки на основе модифицированного метода критических отверстий.

1. Методика расчета характеристик генератора смеси для прецизионной термоимпульсной обработки

Предлагаемое решение использует подход, предложенный в работе [3], при котором вместо постоянства массового расхода обеспечивается постоянство соотношения расходов компонент смеси. Наиболее просто это достигается введением в линии подачи газов промежуточных ёмкостей различного объёма (рис. 1).

При таком решении после заполнения ёмкостей до заданного уровня давления подача газов в них прекращается. В дальнейшем генерация смеси происходит после открытия клапанов 10 и 20 в смеси-теле с критическими отверстиями 21. Газы при этом

свободно истекают из ёмкостей без применения каких-либо регулирующих устройств.

Покажем, что в этом случае требуемый уровень точности дозирования компонент топливной смеси для прецизионной термоимпульсной обработки может быть обеспечен за счет правильного выбора площадей критических отверстий, объёмов ёмкостей и начальных давлений в них.

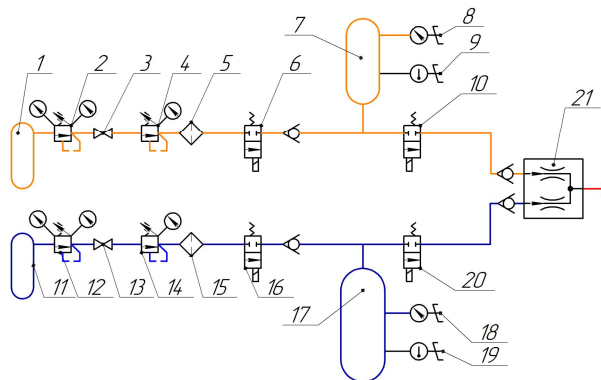


Рис. 1. Схема устройства для генерации топливной смеси для прецизионной термоимпульсной обработки:

- 1, 11 – баллоны с газом; 2, 4, 12, 14 – редуктор;
- 3, 15 – вентиль; 5, 15 – фильтр; 6, 10, 16, 20 – электромагнитный клапан;
- 7, 17 – промежуточные ёмкости;
- 8, 18 – датчик давления; 9, 19 – датчик температуры;
- 21 – критические отверстия

Подобные задачи подробно рассматривались в работах, посвященных расчету характеристик импульсных аэродинамических труб. При этом для задач о перетекании газа используются следующие упрощающие предположения [7]:

- о квазистационарности перетекания, т.е. параметры газов считаются переменными во времени, но одинаковыми во всем объёме каждой из ёмкостей;
- об адиабатичности перетекания;
- о возможности применения модели совершенного газа.

При условии обеспечения сверхкритического перепада давления между ёмкостями, содержащими компоненты топливной смеси и рабочей камерой, выражения для назначения площадей критических отверстий, объёмов и начального давления промежуточных ёмкостей могут быть получены на основе уравнений термодинамического анализа систем с переменной массой рабочего тела [8].

Для определения параметров газов в промежуточных ёмкостях используем первый закон термодинамики:

$$dQ = dU + dL . \quad (1)$$

Для ёмкости постоянного объёма $dL = 0$, а при адиабатическом истечении потери тепла связаны только с уносом вместе с вытекающим газом, т.е.

$$dQ = -G i dt,$$

где G – массовый расход газа;

i – энтальпия.

С другой стороны, изменение внутренней энергии газа с учетом уравнения состояния может быть записано как

$$dU = d(C_V m T) = C_V \frac{V}{R} \cdot dP = \frac{V}{k-1} \cdot dP, \quad (2)$$

где V – объём ёмкости;

k – показатель адиабаты соответствующего компонента топливной смеси.

Из (1) и (2) следует

$$dP = -\frac{k-1}{V} \cdot G \cdot C_P \cdot T \cdot dt. \quad (3)$$

При сверхкритическом перепаде давлений мгновенное значение массового расхода через критическое отверстие определяется выражением [7]:

$$G = \frac{\mu F P}{\sqrt{RT}} \psi, \quad (4)$$

где $\psi = \sqrt{k(2/k+1)^{\frac{k+1}{k-1}}}$;

μ – коэффициент расхода (при $\mu = 1$ истечение газа является идеальным);

F – площадь поперечного сечения критического отверстия.

Текущие значения температуры в ёмкости в (3), (4) определяются как:

$$T = T_0 (P/P_0)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (5)$$

где T_0, P_0 – начальная температура и давление в ёмкости.

Интегрируя (3) с учетом выражений (4) и (5) получим:

$$P = P_0 (1 + Bt)^{\frac{-2k}{k-1}}, \quad (6)$$

где $B = \frac{(k-1)F\sqrt{RT_0}}{2V} \psi$.

Без потери общности рассмотрим случай двухкомпонентной топливной смеси. Будем исходить из того, что в качестве условия задано соотношение массовых концентраций компонент смеси

$$c_1/c_2 = \beta. \quad (7)$$

Задавая значение площади критического отверстия, объёма промежуточной ёмкости и начального давления в ней для одного из компонентов (например, F_2, V_2, P_{02}) и устанавливая соотношение площадей критических отверстий установим исходя из

условий в начальный момент времени $G_1/G_2 = \beta$, $P_1 = P_2 = P_{02}$, $T_1 = T_2 = T_0$ из (4) получим:

$$F_1 = \beta \cdot F_2 \frac{\mu_2 \sqrt{M_2} \psi_2}{\mu_1 \sqrt{M_1} \psi_1}, \quad (8)$$

где M_1, M_2 – молярные массы газов, образующих смесь.

Так как показатели адиабаты газов, составляющих топливные смеси для термоимпульсной обработки различны (в качестве окислителя используются двухатомные газы, а топлива – многоатомные), при свободном истечении обеспечить равенство давлений и температур в ёмкостях не удастся.

Однако подставляя для обеих компонент выражения (6) и (8) в формулу (5) для текущей температуры получим, что соотношение $T_1 = T_2$ соблюдается тождественно при равенстве начальных температур $T_{10} = T_{20} = T_0$ и соотношении объемов ёмкостей, задаваемым выражением

$$V_1 = \beta \cdot V_2 \frac{\mu_2 M_2 k_1 - 1}{\mu_1 M_1 k_2 - 1}. \quad (9)$$

При этом давления в ёмкостях газов, а исходя из (4) и массовые расходы компонент в ходе наполнения будут меняться по-разному. Однако точности обеспечения заданной массовой концентрации газов в смеси можно добиться за счет задания начальных давлений в ёмкостях, исходя из выражения:

$$\int_0^\tau G_1 dt / \int_0^\tau G_2 dt = \beta, \quad (10)$$

где τ – время наполнения камеры топливной смесью.

После подстановки в (10) выражений (4), (5), (6) и (8) оно преобразуется к виду:

$$\frac{P_{01}}{P_{02}} = \frac{\int_0^\tau (1 + B_2 t)^{\frac{-k_2+1}{k_2-1}} dt}{\int_0^\tau (1 + B_1 t)^{\frac{-k_1+1}{k_1-1}} dt}. \quad (11)$$

При термоимпульсной обработке величина тепловых потоков, действующих на обрабатываемые детали, определяется конвективным теплообменом [9]. Поэтому для стабилизации тепловых потоков при выполнении последовательных циклов обработки одинаковых изделий нужно обеспечить как постоянство коэффициента теплоотдачи, зависящего от плотности смеси, так и начального перепада температур между продуктами сгорания и поверхностью деталей.

Исходя из первого условия, время наполнения камеры смесью определяется как время, за которое для одного из компонентов масса, поданная в камеру, становится равной заданной. Исходя из приня-

тых допущений, это приводит к следующей зависимости:

$$m_2 = \int_0^{\tau} G_2 dt, \quad (12)$$

которая, после подстановки в нее выражений (5), (6) и интегрирования, дает для определения величины τ в (11) выражение:

$$\tau = \frac{1}{B_2} \left(\left(\frac{A_2}{A_2 - C_2} \right)^{\frac{k_2 - 1}{2}} - 1 \right), \quad (13)$$

где $A_2 = \mu_2 F_2 \psi_2 P_{02} (k_2 - 1)$ и $C_2 = 2m_2 B_2 \sqrt{R_2 T_0}$.

Для определения закона изменения давления будем использовать условие равенства энтальпий струй, вытекающих из ёмкостей и струй, втекающих в рабочую камеру, что приводит к следующей зависимости изменения давления в камере от времени наполнения:

$$P_K = P_{01} \frac{V_1}{V_K - V_D} \left[1 - (1 + t \cdot B_1)^{\frac{-2k_1}{k_1 - 1}} \right] + P_{02} \frac{V_2}{V_K - V_D} \left[1 - (1 + t \cdot B_2)^{\frac{-2k_2}{k_2 - 1}} \right] + P_{K0}, \quad (14)$$

где V_D – суммарный объем деталей и приспособлений в рабочей камере;

P_{K0} – начальное давление в камере (обычно равное атмосферному).

Для правильной работы системы генерации смеси необходимо обеспечение сверхкритического перепада давления между ёмкостями и камерой в течение всего времени наполнения, которое также зависит от показателя адиабаты газа:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &> P_K \cdot \left(\frac{2}{k_1 + 1} \right)^{-k_1 / (k_1 - 1)} \\ P_2 &> P_K \cdot \left(\frac{2}{k_2 + 1} \right)^{-k_2 / (k_2 - 1)} \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

Как отмечается в работе [7], параметры газовой смеси в рабочей камере не могут быть определены по зависимостям для адиабатического или политропического процесса. Поэтому для определения температуры в камере необходимо применить уравнение состояния совершенного газа:

$$T_K = \frac{P_K}{\rho_{CM} R_{CM}}, \quad (16)$$

где ρ_{CM}, R_{CM} – плотность и газовая постоянная смеси, определяемые по текущей массовой концентрации компонент выражениями:

$$1/\rho_{CM} = c_1/\rho_1 + c_2/\rho_2, \quad (17)$$

$$R_{CM} = c_1 R_1 + c_2 R_2. \quad (18)$$

Входящие в выражения (6), (8) и (13) коэффициенты расхода критических отверстий представляют собой отношение реального массового расхода через отверстие к его идеальному значению и учитывают сжатие струи при истечении и потери напора на трение. Для заданной конфигурации критических отверстий они могут быть определены либо на основе известных методик, использующих аналитические решения одномерных моделей течения газа [10, 11], или численно при моделировании в CFD пакетах.

В качестве примера использования предложенной методики рассмотрим возможности обеспечения точности дозирования компонент стехиометрической топливной смеси CH_4-O_2 ($\beta = 4$). В качестве исходных данных для расчетов приняты следующие значения:

– для CH_4 : $\rho = 0,7168$ [кг/м³]; $M = 16,04 \cdot 10^{-3}$ [кг/Моль]; $k = 1,32$; $R = 518,37$ [Дж/(кг·К)];
– для O_2 : $\rho = 1,47$ [кг/м³]; $M = 32,0 \cdot 10^{-3}$ [кг/Моль]; $k = 1,4$; $R = 259,8$ [Дж/(кг·К)].

Объем рабочей камеры термоимпульсной установки принят равным $15 \cdot 10^{-3}$ [м³], рабочее давление и температура смеси в камере 1,0 [МПа] при 293 [К]. Начальные значения давления и температуры в ёмкости метана приняты равными 3,5 [МПа] и 293 [К]. Диаметр критического отверстия для метана был выбран равным 1 [мм], а объём промежуточной ёмкости $10 \cdot 10^{-3}$ [м³].

Рассчитанные по зависимостям (8) и (9) значения диаметра критического отверстия и объёма промежуточной ёмкости для кислорода округлялись с учетом возможностей изготовления и составили 1,666 [мм] и $25,062 \cdot 10^{-3}$ [м³]. Дальнейшие расчеты производились для округлённых значений.

Для приведенных величин параметров время наполнения камеры термоимпульсной установки до заданного уровня давления составило 7,62 с. Начальное давление в ёмкости для кислорода, рассчитанное по зависимости (11) составило 3,446 [МПа]. На рис. 2 приведены графики изменения давления в ёмкостях метана и кислорода по времени наполнения камеры. Разница температур в ёмкостях на протяжении наполнения не превосходит 0,002 К.

На рис. 3 приведен график зависимости давления в рабочей камере по времени наполнения смесью, полученный с использованием выражения (14). К моменту окончания наполнения перепад давления между ёмкостью метана и камерой $\frac{P}{P_K} = 2,13$ (при критическом перепаде 1,844), а ёмкостью кислорода

и камерой $\frac{P}{P_K} = 2,163$ (при критическом перепаде 1,893). Таким образом, условия (15) выполняются.

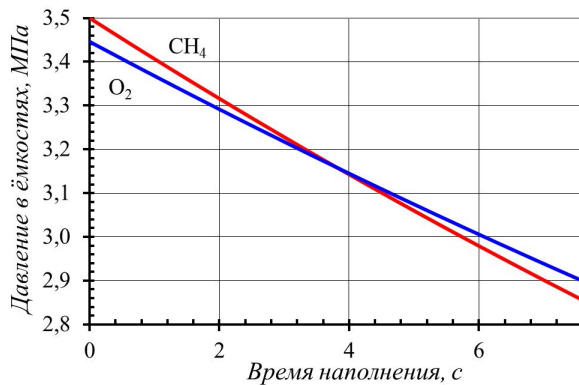


Рис. 2. Зависимости давления в промежуточных емкостях от времени наполнения камеры

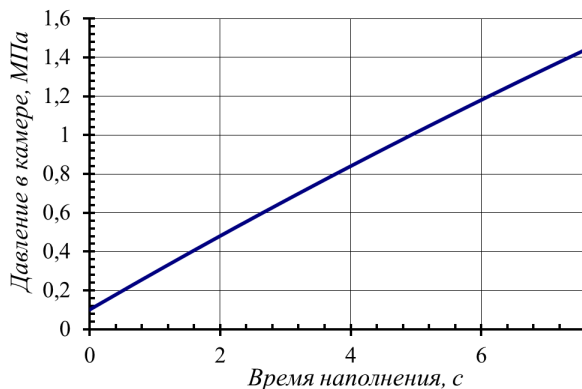


Рис. 3. Зависимость давления в камере от времени наполнения

На рис. 4 приведены графики изменения мгновенного соотношения массового расхода компонент топливной смеси $\beta^* = G_{O_2}/G_{CH_4}$ по времени наполнения камеры. На этом же рисунке показаны значения заданного соотношения массовых концентраций ($\beta = 4$ для стехиометрической смеси) и полученной после окончания наполнения величины данного соотношения $\beta_{ср}$. В результате погрешность обеспечения соотношения массовых концентраций компонент топливной смеси составила менее 0,01 %.

На рис. 5 приведен график изменения температуры топливной смеси в камере по времени наполнения. За счет сжатия смеси конечная температура превышает начальную более чем на 80 °.

Таким образом, выбор параметров системы генерации смеси по зависимостям (4) – (18) позволяет обеспечить требуемую для прецизионной термоимпульсной обработки точность дозирования компо-

нент с использованием предложенной модификации метода критических отверстий.

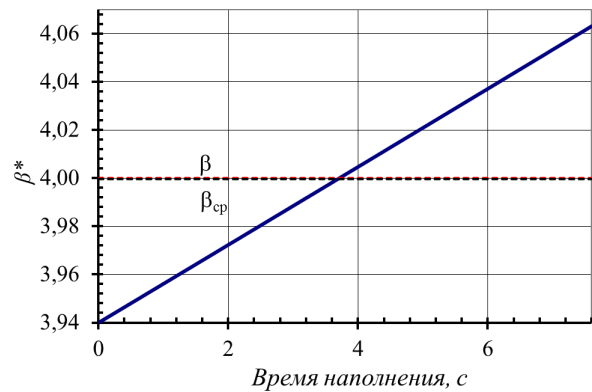


Рис. 4. Зависимость соотношения массового расхода компонент смеси от времени наполнения камеры

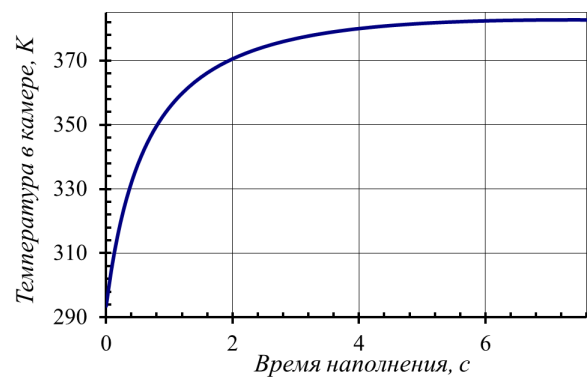


Рис. 5. Зависимость температуры в камере от времени наполнения

2. Алгоритм управления генерацией смеси при сверхкритическом истечении компонент из промежуточных емкостей

Укрупненная блок-схема системы генерации смеси для прецизионной термоимпульсной обработки приведена на рис. 6. Исходными данными для генерации смеси являются сведения о свойствах компонентов смеси, содержащиеся в базе данных системы управления установкой, а также значения коэффициентов расходов критических отверстий. Эти значения должны быть получены предварительно путем калибровки трактов подачи газов при помощи высокоточного массового расходомера.

Генератор смеси может предусматривать возможность работы на различных горючих газах. В этом случае, по крайней мере, одно критическое отверстие и одна промежуточная ёмкость должны иметь возможность регулировки размеров.

При установке давления в промежуточных ёмкостях для базового компонента смеси целесообразно использовать пропорциональный клапан с регу-

лировкой расхода в зависимости от давления в ёмкости. Для настраиваемого компонента смеси в этом случае возможно использование дифференциального измерителя давления. Такое решение позволяет уменьшить погрешность установки давления в ёмкостях, что непосредственно влияет на точность компонентного состава топливной смеси.

В блоке подачи компонентов смеси предусматривается управление скоростью открытия клапанов подачи газов (10 и 20 на рис. 2).

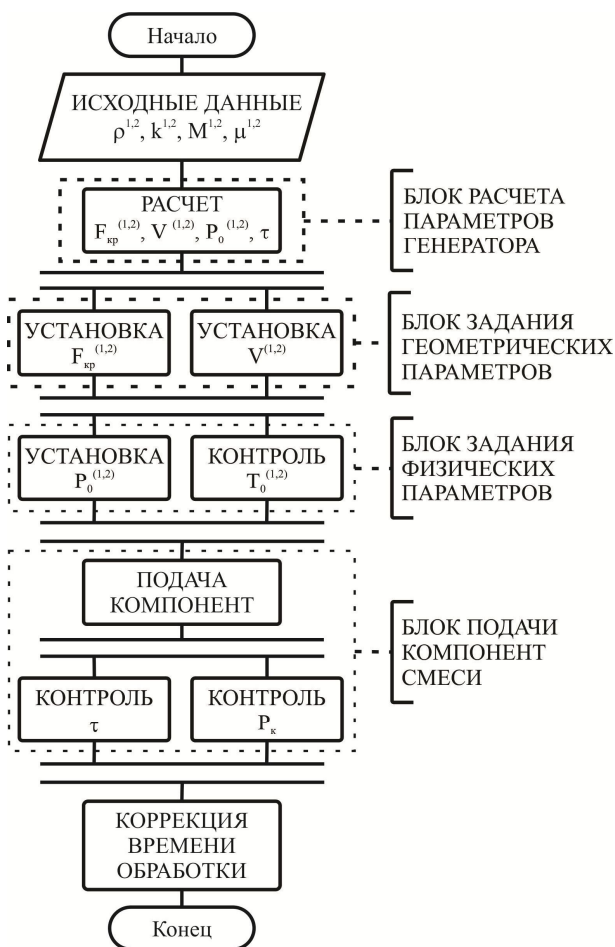


Рис. 6. Укрупненная блок-схема системы управления генерацией смеси для прецизионной термоимпульсной обработки

Это необходимо потому, что в начале открытия клапанов критическое сечение возникает именно в них, а не на критических отверстиях. Поэтому скорость открытия (и закрытия) клапанов должна быть разной и устанавливаться исходя из условия обеспечения соотношения площадей, задаваемых выражением (8).

Кроме того, для повышения точности дозирования теплового потока при термоимпульсной обработке в блоке подачи компонент предусматривается контроль как расхода компонентов смеси, так и её

давления в камере. При известных значениях начального давления в ёмкостях для составляющих смеси контроль расхода с высокой точностью может осуществляться по времени наполнения.

Контроль давления же необходим для определения начальной температуры смеси по значениям массы заряда и объёма газа в камере по зависимости (16). Как показано ранее, даже без учета теплообмена со стенками температура в камере при наполнении смесью может существенно меняться.

При циклической работе термоимпульсной установки стенки камеры могут существенно нагреваться, что может ещё больше повысить температуру смеси.

В то же время, как уже отмечалось выше, при конвективном теплообмене, который превалирует при термоимпульсной обработке, тепловой поток зависит от перепада температуры между продуктами сгорания и стенками детали.

Поскольку повышение начальной температуры смеси приводит к пропорциональному повышению температуры продуктов сгорания, что при неизменном значении времени обработки может привести к изменению теплового потока на 3...5 %, при прецизионной обработке должна предусматриваться возможность коррекции времени обработки в зависимости от температуры смеси.

На рис. 7 приведена блок-схема алгоритма расчета параметров генератора смеси с использованием описанной выше методики.

При расчёте производится контроль обеспечения сверхкритического перепада давления в течение всего периода генерации смеси по зависимости (15), а также контроль неперевышения допустимого давления в ёмкостях, заданных техническими условиями эксплуатации установки.

Настройки оборудования, определенные при расчете параметров генератора, в дальнейшем используются в блоке задания геометрических параметров (F_1, V_1), блоке задания физических параметров (P_{0i}) и блоке подачи компонент (F_i, τ).

Заключение

1. Предложен способ генерации топливных смесей для прецизионной термоимпульсной обработки на основе метода критических отверстий, отличающийся тем, что при смесеобразовании используется свободное истечение газов из предварительно наполненных промежуточных ёмкостей.

2. Разработана методика расчета параметров генератора смеси на основе предложенного способа, позволяющая по заданному составу и давлению смеси при нормальной температуре определить

соотношение площадей критических отверстий, объёмов ёмкостей, начального давления в них и времени наполнения камеры. Показано, что применение данной методики позволяет обеспечить точность дозирования компонент на уровне порядка 0,01 %.

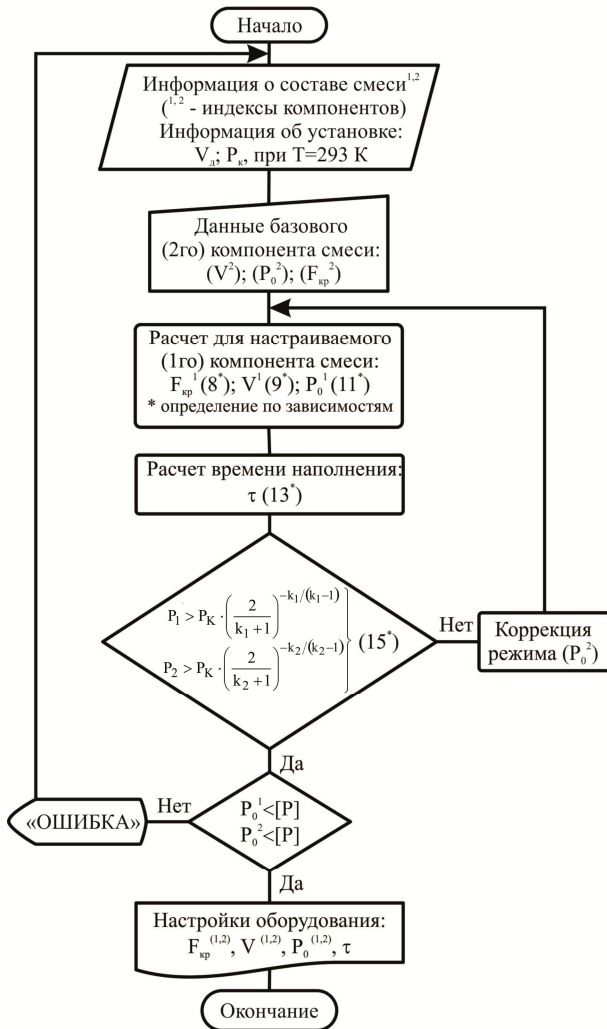


Рис. 7. Блок-схема алгоритма расчёта параметров генератора смеси

3. Разработан алгоритм управления генерацией смеси для прецизионной термоимпульсной обработки. Показана необходимость управления скоростью открытия и закрытия клапанов подачи газов с учетом требуемого значения соотношения площадей критических отверстий.

4. Для обеспечения стабильного значения тепловых потоков при циклической термоимпульсной обработке показана необходимость одновременного контроля массы заряда и давления в камере при подаче топливной смеси с последующей коррекцией времени обработки по рассчитанной начальной температуре топливной смеси.

Литература

1. Планковский, С. И. Перспективы применения современных методов генерации газовых смесей для прецизионной термоимпульсной обработки [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, С. А. Заклинский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2017. – № 3 (138). – С. 85–93.

2. *Gas analysis – Preparation of calibration gas mixtures using dynamic methods – Part 6: Critical flow orifices [Text] : ISO 6145-6:2016*. – Publ. 2017-07-01. – ISO/TC 158, 2017. – 27 p.

3. *High-accuracy stable gas flow dilution using an internally calibrated network of critical flow orifices [Text] / P. J. Brewer, B. A. Goody, T. Gillam et al. // Measurement science and technology*. – 2010. – Vol. 21, no. 1. – P. 115902-1–8. DOI: 10.1088/0957-0233/21/1/115902.

4. *A high accuracy dilution system for generating low concentration reference standards of reactive gases [Text] / P. J. Brewer, M. D. Miñarro, E. Amico di Meane, R. J. C. Brown // Measurement*. – 2014. – Vol. 47. – P. 607–612. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.09.045.

5. *Słomińska, M. New developments in preparation and use of standard gas mixtures [Text] / M. Słomińska, P. Konieczka, J. Namieśnik // Trends in Analytical Chemistry*. – 2014. – Vol. 62. – P. 135–143. DOI: 10.1016/j.trac.2014.07.013.

6. *Dynamic method of gas mixtures creation for plasma technologies [Text] / S. Plankovskyy, O. Shypul, S. Zaklinsky, O. Tryfonov // Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*. – 2018. – No. 5 (117). – P. 10–14.

7. *Звезинцев, В. И. Газодинамические установки кратковременного действия. Ч. 1: Установки для научных исследований [Текст] / В. И. Звезинцев*. – Новосибирск : Параллель, 2014. – 550 с.

8. *Мамонтов, М. А. Вопросы термодинамики тела переменной массы [Текст] / М. А. Мамонтов*. – М. : Оборонгиз, 1961. – 56 с.

9. *Адонин, С. М. О теплоотдаче продуктов детонации газовой смеси в камере [Текст] / С. М. Адонин, В. И. Манжалеи // Нестационарные проблемы механики : сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики*. – Новосибирск, 1986. – Вып. 74. – С. 3–10.

10. *Рябокоть, М. П. О коэффициенте сжатия струи при истечении газа через отверстие с острой входной кромкой [Текст] / М. П. Рябокоть // Ученые записки ЦАГИ*. – 1977. – Т. VIII, № 1. – С. 43–51.

11. *Лухтура, Ф. И. К вопросу об установившемся режиме истечения газа из осесимметричных отверстий и сопел [Текст] / Ф. И. Лухтура // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки : зб. наук. пр. / ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т»*. – Маріуполь, 2015. – Вип. 30, т. 1. – С. 213–225.

References

1. Plankovskii, S. I., Shipul', O. V., Zaklinskii, S. A. Perspektivy primeneniya sovremennykh metodov generatsii gazovykh smesei dlya pretsizionnoi termoimpul'snoi obrabotki [Application perspectives of modern methods for gas mixtures generating to precision thermal pulse treatment]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology*, 2017, no. 3 (138), pp. 85–93.
2. ISO 6145-6:2016. *Gas analysis – Preparation of calibration gas mixtures using dynamic methods – Part 6: Critical flow orifices*. ISO/TC 158, 2017. 27 p.
3. Brewer, P. J., Goody, B. A., Gillam, T., Brown, R. J. C., Milton, M. J. T. High-accuracy stable gas flow dilution using an internally calibrated network of critical flow orifices. *Measurement science and technology*, 2010, vol. 21, no. 1, pp. 115902-1–8. DOI: 10.1088/0957-0233/21/1/115902.
4. Brewer, P. J., Miñarro, M. D., Amico di Meane, E., Brown, R. J. C. A high accuracy dilution system for generating low concentration reference standards of reactive gases. *Measurement*, 2014, vol. 47, pp. 607–612. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.09.045.
5. Słomińska, M., Konieczka, P., Namieśnik, J. New developments in preparation and use of standard gas mixtures. *Trends in Analytical Chemistry*, 2014, vol. 62, pp. 135–143. DOI: 10.1016/j.trac.2014.07.013.
6. Plankovskyy, S., Shypul, O., Tryfonov, O., Zaklinskyy, S. Dynamic method of gas mixtures creation for plasma technologies. *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*, 2018, no. 5 (117). pp. 10–14.
7. Zvegintsev, V. I. *Gazodinamicheskie ustanovki kratkovremennogo deistviya. Ch. 1: Ustanovki dlya nauchnykh issledovaniy* [Gas-dynamic installations of short-term action. Part 1: Installations for scientific research]. Novosibirsk, Parallel' Publ., 2014. 550 p.
8. Mamontov, M. A. *Voprosy termodinamiki tela peremennoi massy* [The problems of thermodynamics of a body with variable mass]. Moscow, Oborongiz Publ., 1961. 56 p.
9. Adonin, S. M., Manzhalei, V. I. O teplootdache produktov detonatsii gazovoi smesi v kamere [About heat transfer of detonation products of a gas mixture in a chamber]. *Nestatsionarnye problemy mekhaniki – Non-stationary problems of mechanics*, 1986, vol. 74, pp. 3–10.
10. Ryabokon', M. P. O koeffitsiente szhatiya strui pri istechenii gaza cherez otverstie s ostroi vkhodnoi kromkoi [About the coefficient of compression of the jet when the gas flows through a hole with a sharp entrance edge]. *Uchenye zapiski TsAGI – Scientific notes TsAGI*, 1977, vol. VIII, no. 1, pp. 43–51.
11. Luhtura, F. I. K voprosu ob ustanovivshemsya rezhime istecheniya gaza iz osesimmetrichnykh otverstii i sopel [To the question of the steady-state regime for the outflow of gas from axisymmetric apertures and nozzles]. *Visnyk Pryazovsk'oho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the priazovskiyi state technical university. Section: Technical Sciences*, 2015, vol. 30, no. 1, pp. 213–225.

Поступила в редакцію 01.08.2018, рассмотрена на редколлегии 3.10.2018

АЛГОРИТМ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ ГЕНЕРАЦІЇ СУМІШІ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ТЕРМОІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ

С. І. Планковський, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, С. О. Заклинський

Предметом дослідження є способи і пристрої генерації газових сумішей із заданою точністю і високою повторюваністю дозування компонент. **Метою** статті є розробка алгоритму управління системою генерації паливної суміші установки для прецизійної термоімпульсної обробки. У зв'язку з цим, в якості **завдань дослідження** розглядаються вдосконалення методу критичних отворів стосовно завдань термоімпульсної обробки і розробка методики призначення параметрів системи генерації суміші, що забезпечують високу точність і повторюваність дозування її компонент і теплових потоків. Отримані наступні **результати**. Запропоновано метод динамічного сумішоутворення на основі методу критичних отворів, що відрізняється тим, що в ході наповнення камери компоненти паливної суміші витікають з попередньо наповнених до заданого тиску проміжних ємностей регульованого об'єму без застосування будь-яких регулюючих пристроїв. Розроблено методику вибору діаметрів критичних отворів, об'ємів проміжних ємностей і початкового тиску в них, що забезпечує точність дозування компонент на рівні близько 0,01 %. Запропоновано технічні рішення, що дозволяють стабілізувати величину теплових потоків при термоімпульсній обробці з урахуванням динаміки спрацьовування клапанів системи генерації суміші і змінної температури стінок камери. Сформульовано наступні **висновки**. Запропоновано спосіб генерації паливних сумішей для прецизійної термоімпульсної обробки на основі методу критичних отворів, що відрізняється тим, що при сумішоутворення використовується вільне витікання газів з попередньо наповнених проміжних ємностей. Розроблено методику розрахунку параметрів генератора суміші на основі запропонованого способу, що дозволяє за заданим складом і тиском суміші при нормальній температурі визначити співвідношення площ критичних отворів, об'ємів ємностей, початкового тиску в них і часу наповнення камери. Розроблено алгоритм управління генерацією суміші для прецизійної термоімпульсної обробки. Показана необхідність управління швидкістю відкриття і закриття клапанів подачі газів з урахуванням співвідношення площ критичних отворів. Для забезпечення стабільного значення теплових потоків при циклічній термоімпульсній обробці показана необхідність од-

ночасного контролю маси заряду і тиску в камері при подачі паливної суміші з подальшим коригуванням часу обробки по розрахованій початковій температурі паливної суміші.

Ключові слова: прецизійна термоімпульсна обробка; генерація суміші газів; точність дозування.

ALGORITHM OF MIXTURE GENERATION CONTROL SYSTEM FOR PRECISION THERMAL PULSE TREATMENT

S. I. Plankovskyy, O. V. Shypul, O. V. Tryfonov, S. O. Zaklinskiy

The **subjects** of the study are methods and devices of generating gas mixtures with a specified accuracy and a high repeatability of the component dosing. The **purpose** of the article is to develop an algorithm for controlling the fuel mixture generation system for precision thermal pulse treatment. In that behalf, the research **tasks** are the improvement of the critical hole method with reference to the thermal pulse treatment and the methodology development of parameters assigning for mixture generation system ensuring high accuracy and repeatability of the dosing of its components and heat flows in thermal pulse treatment. The following **results** are obtained. The method of dynamic mixture formation based on the method of critical holes is proposed. Its special advantage is that during the filling of the chamber, the components of the fuel mixture expire from the pre-filled intermediate pressure vessels with the controlled volume without the application of any regulating devices. The technique for choosing the diameters of critical apertures, the volumes of intermediate tanks and the initial pressure in them, providing accuracy of components dosing at the level 0,01 % is developed. The technical solutions that allow to stabilize the value of heat flow during thermal pulse treatment, considering the operation dynamics of the valves in the mixture generation system and the variable temperature of the chamber walls are proposed. The following **conclusions** are formulated. The method of generating fuel mixtures for precision thermal pulse treatment based on the method of critical holes is proposed. It is characterized by the fact that during the mixture formation, the free exhaust of gases from pre-filled intermediate tanks is applied. The developed procedure for calculating the parameters of the mixture generator on the basis of the proposed method makes it possible to determine the ratio of the areas of the critical holes, the volumes of the tanks, the initial pressure in them and the time of filling the chamber according to the given composition and pressure of the mixture at normal temperature. The algorithm for controlling the generation of a mixture for precision thermal pulse processing is developed. The necessity of controlling the opening and closing speed of the gas supply valves is shown taking into account the required ratio of the areas of critical holes. To ensure a stable value of heat fluxes during cyclic thermal pulse treatment, it is shown that it is necessary to simultaneously monitor the charge mass and the pressure in the chamber when the fuel mixture is supplied, followed by correcting the treatment time according to the calculated initial temperature of the fuel mixture.

Keywords: precision thermal pulse treatment; gas mixture generation; dosing accuracy.

Планковский Сергей Игоревич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: s.plank@khai.edu.

Шипуль Ольга Владимировна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: o.shipul@khai.edu.

Трифонов Олег Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: o.v.trifonov@gmail.com.

Заклинский Сергей Александрович – аспирант кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: s.zaklinskiy@khai.edu.

Plankovskyy Sergiy Igorevych – Doctor of Techn. Sci., Professor of Aircraft Manufacturing Chair, National Aerospace University "KhAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: s.plank@khai.edu.

Shypul Olga Volodymyrivna – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Aircraft Manufacturing Chair, National Aerospace University "KhAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: o.shipul@khai.edu.

Tryfonov Oleg Valerijovych – PhD, Associate Professor of Aircraft Manufacturing Chair, National Aerospace University "KhAI", Kharkov, Ukraine, o.v.trifonov@gmail.com.

Zaklinskiy Sergey Aleksandrovich – Postgraduate student of Aircraft Manufacturing Chair, National Aerospace University "KhAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: s.zaklinskiy@khai.edu.