

УДК 533.27 + 621.6.057

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

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ГЕНЕРАЦИИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ ТЕРМОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Рассмотрены направления совершенствования системы смесеобразования для термоимпульсного оборудования. Сформулированы требования к точности дозирования компонент топливной смеси для прецизионной термоимпульсной обработки исходя из калиметрических показателей кромок прецизионных деталей, установленных международными стандартами. Выполнен обзор методов генерации газовой смеси с высокоточным соотношением компонентов, рассмотрены их особенности, достоинства и недостатки применительно к термоимпульсному оборудованию. В качестве наиболее перспективного метода для решения этой задачи обосновано применение метода критических отверстий.

Ключевые слова: прецизионные детали, термоимпульсная обработка, генерация высокоточных газовых смесей.

Введение

Как показано в работе [1] повышение точности размерной обработки и миниатюризация высокоточных механизмов являются четко сформировавшимися тенденциями развития прецизионного машиностроения. Это еще более повышает требования к финишной отделке кромок деталей, входящих в состав такого рода изделий.

Современные международные стандарты содержат более 10 калиметрических показателей, характеризующих требования по качеству обработки кромок прецизионных деталей [1]. Основными из них являются радиус скругления кромки (который может иметь порядок $10^{-3} \dots 10^{-1}$ мм) и его допустимое отклонение ($\pm 10^{-3} \dots 10^{-2}$ мм для высокоточных деталей).

В работе [3] показано, что одним из наиболее перспективных способов финишной отделки кромок прецизионных деталей является термоимпульсная обработка детонирующими газовыми смесями. Однако применяющаяся в существующем оборудовании схема генерации топливной смеси с последовательной подачей компонентов в камеру имеет существенные недостатки.

В частности, состав получаемой смеси при окончании наполнения крайне неравномерен. Наибольшие отличия от стехиометрического состава наблюдаются вблизи конструктивных элементов сложной формы – проточек, глухих отверстий, т.е. элементов, характерных для корпусных деталей агрегатов двигателей [4].

В работе [5] установлено, что неоднородность топливной смеси оказывает существенное влияние

на уровень температур продуктов для деталей, имеющих конструктивные элементы сложной формы. Перепад температур вблизи различных участков обрабатываемых поверхностей может составлять более 1000°C .

Кроме того, как показано в работе [6] при циклической работе термоимпульсной установки контроль наполнения по давлению может привести к существенной, более 10%, погрешности задания массы заряда из-за нагрева газа при наполнении в ходе теплообмена с горячими стенками камеры.

Проблемы с точностью дозирования смеси существуют также в системах смесеобразования, применяемых в термознергетическом оборудовании фирм Bosch, Kennametal, ATL. Дополнительной проблемой является то, что до настоящего времени требования по точности обеспечения состава топливной смеси для финишной отделки прецизионных деталей сформулированы не были.

Поэтому целями настоящей работы являлись формулировка таких требований на базе норм международных стандартов по качеству кромок прецизионных деталей, а также определение направлений создания метода формирования топливных смесей для прецизионной термоимпульсной обработки на основе современных достижений в генерации газовых смесей.

Требования к методу генерации смеси для прецизионной термоимпульсной обработки

В работе [7], сформулированы следующие направления совершенствования системы смесеобра-

зования для термоимпульсного оборудования:

- обеспечение точности дозирования компонента и гомогенности топливной смеси;
- обеспечение универсальности относительно вида топлива;
- автоматическая коррекция работы системы при изменении внешних условий (как правило, температуры);
- повышение точности измерения управляющих параметров;
- обеспечение безопасности работы системы смесеобразования.

Для обоснованного задания требований по точности дозирования компонент газовой смеси был проведен ряд численных экспериментов. На первом этапе оценивалось влияние коэффициента избытка топлива на величину тепловых потоков, действующих при термоимпульсной обработке. На втором - влияние точности задания тепловых потоков на величину радиуса округления кромки и его отклонение.

Для численных экспериментов на первом этапе применялась разработанная ранее модель сгорания и теплообмена в камере термоимпульсной установки [8]. Расчеты проводились для случая сгорания равномерной по компонентному составу смеси метана и пропана с кислородом с различной массовой концентрацией топлива, которая варьировалась в пределах $\pm 5\%$ от стехиометрического соотношения.

Моделирование производилось в два этапа: на первом моделировалось сгорание смеси в детонационном режиме, на втором - теплообмен продуктов сгорания с поверхностью детали в ходе затухания ударных волн. В ходе расчетов временем затухания ударных волн, после достижения которого расчет останавливался, считался момент, для которого максимальное давление в камере превышало его минимальную величину менее чем на 10%.

Как показывают результаты моделирования, изменение массовой концентрации топлива в пределах 5% от стехиометрического соотношения приводит к существенному изменению как величины осредненного удельного теплового потока, так и времени его действия (при 5%-м избытке метана время затухания ударных волн уменьшается на 40%).

Суммарное количество тепла Q , поглощенного единицей площади поверхности детали в течение времени затухания ударных волн, достигает наибольших значений при стехиометрическом составе топливной смеси. При изменении массовой концентрации метана на $\pm 5\%$ его значение уменьшается от 31,3% (при избытке окислителя) до 41,2% (при избытке топлива). Для смеси $C_3H_8-O_2$ характер зависимости суммарного количества тепла, поглощенно-

го единицей площади поверхности детали, от коэффициента избытка топлива аналогичен (рис. 1).

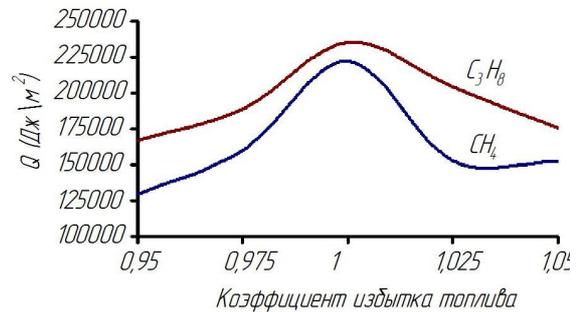


Рис. 1. Количество тепла, поглощенного единицей площади поверхности детали за время затухания ударных волн

При равновероятной возможности возникновения погрешности дозирования компонентного состава, возникающую из-за неточностей измерения контролируемых величин и времени срабатывания клапанов системы смесеобразования, полученные результаты приводят к выводу о необходимости обеспечения точности дозирования компонентного состава смеси в 8 раз более высокой, чем требуемая точность задания теплового потока.

Для оценки влияния точности обеспечения компонентного состава на величину квалитетического показателя кромки (a) проведено моделирование оплавления заусенца с детали [9]. Исследовалась кромка алюминиевой детали с заусенцем длиной $l = 0,5$ мм и толщиной $h = 0,1$ мм. В результате расчетов была получена серия кривых зависимостей показателя кромки (a) от времени действия теплового потока (t) для фиксированного значения осредненного по времени удельного теплового потока (q). Полученные кривые интерполировались и доопределялись для выравнивания интервалов времени.

Серия полученных кривых строилась в виде каркаса поверхности в координатах $a-t-q$, и по полученному каркасу путем сплайн-интерполяции построена поверхность режимов (рис. 2), каждая точка которой представляет собой величину радиуса скругления для некоторой величины осредненного по времени удельного теплового потока и времени обработки.

Для определения требований по точности обеспечения компонентного состава по заданной величине квалитетического показателя кромки [a] строились сечения поверхности режимов термоимпульсной обработки плоскостью $t = \text{const}$.

Анализ полученных кривых показал, что изменение величины осредненного удельного теплового потока на 1% приводит к погрешности радиуса скругления кромки $a \approx \pm 0,05$ мм.

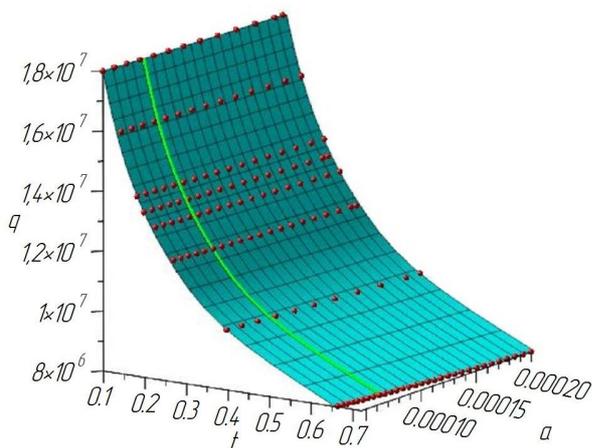


Рис. 2. Поверхность режимов термоимпульсной отделки кромки

Принимая во внимание результаты, полученные при оценке влияния погрешности компонентного состава смеси на величину теплового потока, и требования стандарта качества кромки [1] для кромок типа E2 (острых) можно получить оценку необходимой точности дозирования смеси, приведенную в таблице 1.

Таблица 1

Требования по точности обеспечения теплового потока и компонентного состава смеси для кромок типа E2, материал – алюминий

Допустимые отклонения формы кромки, мм		Допустимые погрешности теплового потока, %		Допустимые погрешности компонентного состава, %	
класс А	класс В	класс А	класс В	класс А	класс В
+0,03	+0,20	0,8	4,0	0,1	0,5

Это дает основания считать, что областью применения термоимпульсной отделки может являться обработка кромок типа E2 и E3. Для кромок типа E3 допустимая погрешность теплового потока и компонентного состава может быть в 2 раза большей, чем для кромок типа E2. Обработка более острых кромок типов E0 и E1 со стабильным качеством потребует генерации топливной смеси с точностью порядка 0,01%, что находится за пределами современного уровня техники для промышленного оборудования.

Рассмотрим возможные направлений создания метода формирования топливных смесей для прецизионной термоимпульсной обработки, удовлетворяющие сформулированным требованиям по точности дозирования. Для этого необходимо провести ана-

лиз возможностей современных методов получения газовых смесей с высокоточным соотношением компонентов. Такие смеси широко используются в технологических процессах с защитной атмосферой, в химических производствах, при производстве полупроводников, нанесении покрытий, в медицине.

Современные методы генерации газовых смесей

Выпускаемые генераторы газовых смесей по точности соотношения компонентов в смеси можно разделить на прецизионные и промышленные. Первые служат для создания в сравнительно небольших объемах поверочных газовых смесей, применяемых при метрологическом обеспечении различных производств. Поэтому из дальнейшего анализа будут исключены методы: диффузионный, насыщения, мембранный и электрохимический, которые применяются для генерации смесей со сверхмалой концентрацией компонент.

Промышленные методы, имея меньшую точность смешивания, характеризуются более высокой производительностью [10]. Существуют два класса такого рода методов: статические и динамические (см. табл. 2).

При использовании статических методов смешивания количество различных газов измеряется объемно, гравиметрически или манометрически. Такие методы часто используются в лабораторных условиях, когда небольшие партии газовых смесей требуются для экспериментальных целей, и они используются в больших масштабах коммерческими поставщиками газовых смесей.

Таблица 2

Промышленные методы смешения газов

Статические	Динамические
Объемный	Поршневых насосов (рис. 3)
Гравиметрический	Периодической инъекции
Манометрический	Непрерывной инъекции
	Критических отверстий
	Термических расходомеров

В работах Ю.А. Сысоева [7,11] были предложены усовершенствованные манометрические способы генерации смесей высокого давления, позволяющие добиться точности дозирования компонента 0,1%. В частности, предлагалось заменить вакуумирование циклической продувкой емкости основным газом и использовать управляемые пропорциональные клапаны для исключения погрешностей, связанных со срабатыванием отсечных клапанов при достижении заданного давления. Это позволило сгенерировать смесь с давлением 1,0 МПа в сосуде

объемом 10 л в течение 3 мин. Кроме этого, предложенный способ не может быть реализован для камер с переменной температурой стенок, что является характерным для термоимпульсной обработки.

Динамические газосмешивающие методы используются в случае необходимости частой корректировки состава потока газовой смеси или когда газовая смесь нестабильна.

Наиболее распространенный метод, используемый для получения потока газа известной скорости, включает калиброванный расходомер и откалиброванный клапан управления потоком. Тем не менее, существуют также методы, которые не зависят от расходомеров.

Описанный в ISO 6145-2 [12] принцип динамического способа генерации смеси основан на *работе объема поршневых насосов*, передающих определенные части газа, которые непрерывно объединяют и гомогенизируют для получения требуемой газовой смеси (рис. 3).

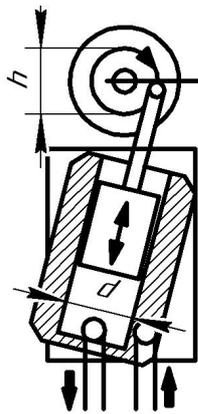


Рис. 3. Схема поршневого насоса: d – диаметр цилиндра; h – высота хода поршня

Каждый компонент газовой смеси подается по отдельности с помощью поршневого насоса; перемешивание компонентов происходит на выходе из мерных цилиндров. Один насос приводится в движение с постоянной скоростью синхронным двигателем, а другой пропорционально этой скорости с помощью зубчатых колес. Замена зубчатых колес изменяет состав смеси. Скорости потока готовой смеси при указанном способе колеблются от 5 л/ч до 500 л/ч в зависимости от используемого оборудования.

Для получения чистых газов, объемная доля i -го компонента в приготовленной газовой смеси, приблизительно равна объему i -го компонента, деленному на общий объем всех компонентов, как указано в формуле (1):

$$\varphi_i \approx \frac{N_i \cdot V_{\text{geo},i}}{\sum N_k \cdot V_{\text{geo},k}}, \quad (1)$$

где φ_i – объемная доля i -го компонента в эксплуатационных условиях поршневых насосов.

Этот метод обеспечивает воспроизводимые (заданной точности и с гарантированной повторяемостью) смеси при условиях:

а) предварительного запуска двигателя не менее, чем на 30 мин для достижения теплового равновесия, преодоления десорбции или растворения газа;

б) исключения разностей давлений, равных или больших 20 Па (2×10^{-4} бар) между двумя входными или 1 кПа (10^{-2} бар) между входными и выпускными трубками.

Указанный метод применим только к газообразным смесям или полностью выпаренным компонентам, включая агрессивные газы, если компоненты не реагируют друг с другом или со смазанными поверхностями насоса.

В термодинамических установках фирмы BOSCH применяется описанная система смесеобразования, однако такое устройство трудно признать универсальным с точки зрения применяемого топлива – при смене типа топлива для обеспечения стехиометрии состава смеси необходимо менять цилиндры-дозаторы.

Генерация газовой смеси *методом непрерывной инъекции* заключается в следующем. Компонент газа, в газовой или жидкой фазе, вытесняется в поток дополнительного газа, через капилляр, в виде иглы шприца или плунжера, который непрерывно приводится в действие двигателем с переменной скоростью (рис. 4).

К достоинствам метода непрерывной инъекции относится возможность подготовки на постоянной основе существенного количества газовой смеси и реализация получения многокомпонентных смесей аналогично двоичным при использовании соответствующего количества шприцов или подачи в один шприц предварительно подготовленной многокомпонентной смеси известного состава. Этот метод также обеспечивает калибровку смеси посредством увеличения объема компонента малыми дозами [13].

Объемная доля, калибровочного компонента, в смеси с дополнительным газом, определяется уравнением:

$$\varphi_A = \frac{q_A}{(q_A + q_B)}, \quad (2)$$

где q_A – объемный расход компонента калибровки А; q_B – объемный расход дополнительного газа В.

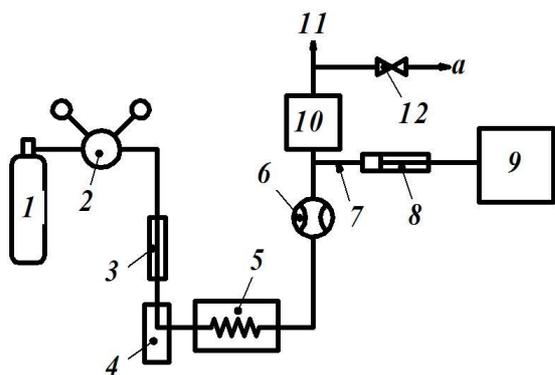


Рис. 4. Схема устройства для производства бинарных поверочных газовых смесей с помощью непрерывной инъекции шприцом: 1 – баллон, заполненный сжатым дополнительным газом; 2 – двухступенчатый регулятор давления; 3 – очиститель; 4 – увлажнитель (если необходимо); 5 – теплообменник в термостате; 6 – расходомер; 7 – манометр дозирования; 8 – шприц; 9 – приводной механизм шприца; 10 – смешивательная камера; 11 – калибровочный газ; 12 – запорный клапан вентиляции; а - вентиляционное отверстие

При смесеобразовании *капиллярным методом* компонент газа пропускается через капиллярную трубку в условиях постоянного перепада давления в контролируемой скорости потока вспомогательного газа (рис. 5). Полученную газовую смесь, можно дополнительно разбавлять через другой капилляр, если требуется низкое содержание компонента [14].

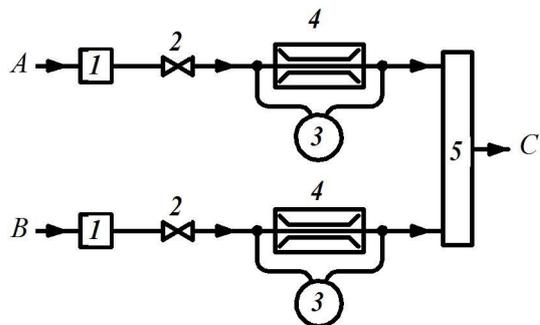


Рис. 5. Схема капиллярного метода получения бинарной газовой смеси: 1 – двухступенчатый регулятор давления; 2 – высокоточный клапан регулировки; 3 – дифференциальный манометр давления; 4 – капиллярная трубка; 5 – камера смешивания; А – газ; В – вспомогательный газ; С – газовая смесь

Объёмный расход q_A выходящего из капилляра газа А приблизительно выражается как:

$$q_A = \frac{\pi r^4 (p_1 - p_2)}{8 \eta L}, \quad (3)$$

где r – радиус капиллярной трубки; p_1 – давление на входе в капилляр; p_2 – давление на выходе капилля-

ра; η – динамическая вязкость газа при температуре использования; L – длина капиллярной трубки.

Работа системы газового смешивания, использующей *метод критических отверстий* (рис. 6) заключается в следующем. Подключенные к смешивательной системе с помощью редукторов 3, 15 и металлических фильтров 5, 17 клапаны газовых баллонов 1, 13, содержащие дополнительный газ и другие газообразные компоненты, открываются. Показания на манометрах 4, 16 приблизительно отрегулированы на 200 кПа (2 bar) выше, чем ожидаемые значения в манометрах (7, 20) соответственно. Регуляторы давления 6, 18 открыты. Закрытием запорного клапана 8 поток дополнительного газа перекрывается и, далее, путем многократного открытия и закрытия, продувается компонентом калибровки. Затем клапан 19 закрывается и с помощью регулятора давления 18 на манометре 20 устанавливается необходимое для получения требуемого расхода давление. Скорость потока на выходе 12 системы отверстий 11 измеряется одним из методов, описанных в ISO 6145-1 [16]. Затем запорный клапан 8 открывается и регулятор давления 6 на манометре 7 устанавливается давление, необходимое для получения требуемого расхода. Объединенный расход дополнительного газа и калибровочного компонента измеряют с помощью подходящего способа в соответствии с ISO 6145-1 [15].

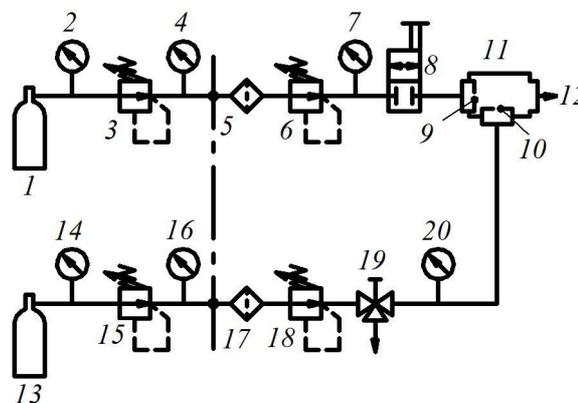


Рис. 6. Схема устройства для приготовления бинарных смесей методом критических отверстий: 1 – баллон с комплементарным газом под давлением; 2 – манометр (входное давление); 3 – редукционный клапан; 4 – манометр (давление подачи); 5 – фильтр; 6 – регулятор давления; 7 – манометр давления; 8 – запорный клапан; 9 – отверстие (комплементарный газ); 10 – отверстие (калибровочный компонент); 11 – система отверстий; 12 – выход для смеси калибровочного газа; 13 – баллон с калибровочным компонентом под давлением; 14 – манометр (входное давление); 15 – редукционный клапан; 16 – манометр (давление подачи); 17 – фильтр; 18 – регулятор давления; 19 – вентиляционный клапан; 20 – манометр

При переходе через критическое отверстие при увеличении входного давления, объемный расход газа, проходящего через отверстие, увеличивается. Когда отношение входного давления газа P_1 и давления газа на выходе из отверстия P_2 достигает критического значения, то при дальнейшем увеличении P_1 объемный расход газа становится независимым по отношению к P_2 . Для того чтобы применять этот способ смешения газов, используемые составляющие должны быть абсолютно чисты от любых твердых или жидких примесей.

При постоянной температуре критическое отношение давлений составляет:

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{\text{crit}} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}, \quad (4)$$

где γ – это отношение молярных теплоемкостей газа при постоянном давлении и при постоянном объеме.

К достоинствам метода относится возможность подготовки многокомпонентных смесей аналогично двоичным смесям при использовании соответствующего числа отверстий, а также подготовка большого количества смеси газа на постоянной основе. Диапазон скоростей потока может быть от нескольких миллилитров до десяти литров в минуту [9].

Объемный расход газа через отверстие зависит от входного давления и температуры в отверстии. Этот факт накладывает особые требования к качеству используемых редукционных клапанов и регуляторов давления для того, чтобы поддерживать давление на входе на постоянном уровне. Небольшие изменения температуры вызывают незначительные изменения соотношения скоростей потока при условии, что температура одинакова на каждом отверстии. Кривая, характеризующая зависимость скорости потока от давления, в свою очередь, зависит от геометрии сопла и направления потока через отверстие. Для получения высокой точности эта кривая должна быть установлена путем калибровки.

Система отверстий, как правило, расположена таким образом, чтобы температура в каждом из отверстий была одинаковой. Тем не менее, если существует разница температур между двумя компонентами для получения бинарной смеси, скорость потока должна быть исправлена за счет коэффициента теплового расширения газа.

Возможным источником ошибок может быть неэффективное смешивание компонента калибровочного и дополнительного газа. Проверка эффективности перемешивания обеспечивается проверкой объемной (или массовой) доли с помощью метода сравнения (ISO 6143).

Метод *термических расходов* (рис. 7), подразумевает использование термических регуляторов массового расхода и позволяет контролировать скорости потока одного или нескольких газобразных компонентов. Датчик потока количества тепла определяет разницу температур до и после прохождения потока газа через электрически нагреваемую нить. Детекторы верхнего и нижнего течения образуют часть моста Уитстона, генерируют сигнал, который после усиления и линейризации, указывает на массовый расход и используется для работы электрического регулирующего клапана. Как только контроллер потока количества тепла был откалиброван для одного газа, калибровка для другого газа может быть вычислена по его теплоемкости при постоянном давлении [17].

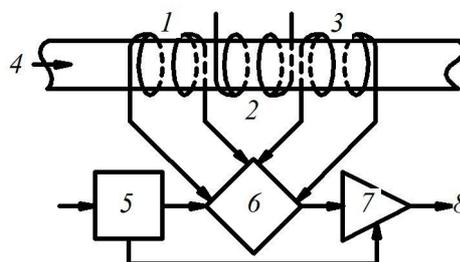


Рис. 7. Принцип работы регулятора теплового массового расхода с постоянной подачей тока: 1, 2 – датчики температуры; 3 – нагреватель; 4 – направление подачи газа; 5 – ток питания; 6 – мост Уитстона; 7 – дифференциальный усилитель; 8 – сигнал

Достоинством метода является то, что большое количество газовой смеси может быть получено на постоянной основе.

Газовые системы смешивания, основанные на контроллерах теплового массового расхода, в том числе некоторые средства компьютеризации и автоматического управления, являются коммерчески доступными. Например, фирмой Kennametal Inc. (США) предложена система генерации смеси для термо-энергетических установок с регулированием давления на основе цифровых контроллеров.

Кроме выше изложенного следует отметить, что качество готовой смеси зависит как от метода ее приготовления, так и от способа калибровки. Способы калибровки даны в ISO 6145-1 [15].

Заключение

Выбор между методами подготовки газовых смесей должен быть основан на диапазоне концентрации, наличии потребного оборудования, необходимой погрешности и универсальности относительно применяемых газов.

Анализ перечисленных в работе методов смесеобразования показывает возможность их применения, принимая во внимание присущие им недостатки, в термоимпульсном оборудовании (табл. 3). Однако для прецизионной термоимпульсной обработки наиболее подходящими методами генерации смеси, с точки зрения минимизации погрешности содержания компонентов смеси, являются объемные (поршневые) насосы и метод критических отверстий. В то же время применение метода критических отверстий особенно просто реализуется при сверхкритическом истечении, когда объемный расход газа стабилизируется автоматически и определяется скоростью звука.

Таблица 3
Возможности различных методов

Метод подготовки	Диапазон объемной доли (Газ В)	Относительная погрешность, %
Объемные насосы	От 10^{-4} до 1	0,5
Непрерывная инъекция	От 10^{-5} до 10^{-2}	5,0
Капиллярный	От 10^{-5} до 1	1,0
Критических отверстий	От 10^{-4} до 1	0,5
Термических расходомеров	От 10^{-9} до 1	1,0

Кроме того, метод критических отверстий обеспечивает универсальность относительно применяемых газов с возможностью достаточно оперативного изменения состава смеси.

Литература

1. Шипуль, О. В. Тенденции развития прецизионного производства [Текст] / О. В. Шипуль // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 1(81). – X., 2015. – С. 77-90.

2. The standardized classification for the edge quality of the precise machining products [Text] / Y. Kato, K. Ohmri, E. Hatano, K. Takazawa // Advanced Materials Research, Volume 24-25, Proceedings 9th International symposium on precision surface finishing and deburring technology, 5 - 7 November 2007, Suzhou, China. – P. 83-90.

3. Современное состояние и перспективы развития технологий финишной отделки прецизионных деталей летательных аппаратов [Текст] / С. И. Планковский, А. В. Лосев, О. В. Шипуль,

О. С. Борисова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 2(69). – С. 39-47.

4. Планковский, С. И. Смесеобразование в камерах термоимпульсных машин при обработке деталей агрегатов двигателей [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, В. Г. Козлов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 9. – С. 7-11.

5. Борисова, О. С. Совершенствование способов дозирования энергии при финишной термоимпульсной очистке прецизионных деталей ЛА [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.02 ; защита 17.05.2011 ; утв. 21.10.2011 / Борисова Ольга Сергеевна – X., 2011. – 154 с.

6. Лосев, А. В. Влияние прогрева камеры сгорания импульсных машин на температуру горючей смеси [Текст] / А.В. Лосев, О. С. Ладухина // Обработка металлов давлением в машиностроении. – Вып. 25. – X., 1989. – С. 90-92.

7. Назначение режимов обработки для автоматизированных термоимпульсных установок в условиях информационно-интегрированного производства [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, В. Л. Малащенко, В. Г. Козлов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэро-космич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 56. – 2012. – С. 67-77.

8. Моделирование теплообмена при затухании ударных волн в замкнутой камере [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, Е. С. Палазюк, В. Л. Малащенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 1. – С. 104-109.

9. Моделирование процесса оплавления заусенцев при термоимпульсной обработке детонирующими смесями [Текст] / С. И. Планковский, А. В. Гайдачук, О. В. Шипуль Е. С. Палазюк // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 3. – С. 4-11.

10. Сысоев, Ю. А. Создание смесей газов для ионно-плазменных технологий [Текст] / Ю. А. Сысоев, В. П. Руденко, А. В. Доломанов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2/5 (68). – С. 15-19. ISSN 1729-3774.

11. Сысоев, Ю. А. Создание многокомпонентных газовых смесей для ионно-плазменных технологий [Текст] / Ю. А. Сысоев // ВАИТ. – 2014. – № 2(90). – С. 137-142. ISSN 1562-6016.

12. ISO 6145-2:2014. Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic methods. Part 2: Piston pumps.

13. ISO 6145-4:2004. Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods. Part 4: Continuous syringe injection method.

14. ISO 6145-5:2009. Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods. Part 5: Capillary calibration devices.

15. ISO 6145-6:2003. Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric me-

thods. Part 6: Critical orifices.

16. ISO 6145-1:2003. *Gas analysis — Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods — Part 1: Methods of calibration.*

17. ISO 6145-7:2009. *Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods. Part 7: Thermal mass-flow controllers.*

References

1. Shipul' O. V. *Tendentsii razvitiya pretsizionnogo proizvodstva* [The trends in the development of precision production]. *Issues of design and manufacture of flying vehicles Sbornik nauchnykh trudov Nacional'nogo ajero-kosmicheskogo universiteta im. N.E. Zhukovskogo «HAI»*. Kharkiv, 2015 no. 1(81), pp. 77-90.

2. Kato, Y., Ohmri, K., Hatano, E., Takazawa, K. The Standardized Classification for Edge Quality of the Precise Machining Products. *Advanced Materials Research, Proceedings 9th International symposium on precision surface finishing and deburring technology*, 5 - 7 November 2007, vol. 24, Suzhou, China, pp. 3-90.

3. Plankovskij, S. I., Losev, A. V., Shipul, O. V., Borisova, O. S. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitiya tehnologij finishnoj otdelki precizionnykh detalej letatel'nykh apparatov [Current state and prospects of development technologies of finishing for precision details of aircrafts]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija - Aerospace technic and technology*, 2010. no. 2(69), pp. 39-47.

4. Plankovskii, S. I., Shipul', O. V., Trifonov, O. V., Kozlov, V. G. Smeseobrazovanie v kamerakh termoimpul'snykh mashin pri obrabotke detalei agregatov dvigatelei. [The mixing in chamber of thermo-puls system at clearing of engine unit workpiece]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija - Aerospace technic and technology*, 2010. no. 9, pp. 7-11.

5. Borisova, O. S. *Sovershenstvovanie sposobov dozirovaniya energii pri finishnoi termoimpul'snoi oshistke pretsizionnykh detalei LA. diss. ... kand. tekhn. nauk* [The improving methods of energy metering at the finish thermo-puls precision parts cleaning LA. Cand. tech. sci. diss.]. Kharkiv, 2011. 154 p.

6. Losev, A. V., Laduhina, O. S., Vlijanie progreva kamery sgoranija impul'snykh mashin na temperaturu gorjuchej smesi [The effect of heating the combustion chamber of pulse machines on the temperature of the combustible mixture]. *Obrabotka metallov davleniem v mashinostroenii*, Kharkiv, 1989, no. 25, pp. 90-92.

7. Plankovskii, S. I., Shipul', O. V., Malashenko, V. L., Kozlov, V. G. Naznachenie rezhimov obrabotki

dlya avtomatizirovannykh termoimpul'snykh ustanovok v usloviyakh informatsionno-integrirovannogo proizvodstva [Appointment of processing regimes for automated thermal-pulse equipment used in computer integrated manufacturing]. *Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii*, 2012, no. 56, pp. 67-77.

8. Plankovskij, S. I., Shipul', O. V., Trifonov, O. V., Palazjuk, E. C., Malashenko, V. L. Modelirovanie teploobmena pri zatuhanii udarnykh voln v zamknutoj kamere. [The simulation of the heat transfer during shock waves damping in an enclosed chamber] *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija - Aerospace technic and technology*, 2014, no. 1, pp. 104-109.

9. Plankovskij, S. I., Gajdachuk, A. V., Shipul', O. V., Palazjuk, E. C. Modelirovanie processa oplavlenija zausencev pri termoimpul'snoj obrabotke detonirujushhimi smesjami [Simulation of the burrs reflow process in thermal-pulse deburring with detonating]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija - Aerospace technic and technology*, 2013, no. 3, pp. 4-11.

10. Sysoev, Yu. A., Rudenko, V. P., Dolomanov, A. V. Cozdanie smesei gazov dlya ionnoplazmennyykh tekhnologii [The creation of gases mixtures for ion plasma technologies]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tehnologij – Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2014, no. 2/5 (68), pp. 15-19.

11. Sysoev, Yu. A. Sozdanie mnogokomponentnykh gazovykh smesei dlya ionno-plazmennyykh tekhnologii [The creation of multi-component gas mixtures for ion-plasma technologies]. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki – Problems of atomic science and technology*, 2014. no. 2(90), pp. 137-142.

12. ISO 6145-2:2014. *Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic methods. Part 2: Piston pumps.*

13. ISO 6145-4:2004. *Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods. Part 4: Continuous syringe injection method.*

14. ISO 6145-5:2009. *Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods. Part 5: Capillary calibration devices.*

15. ISO 6145-6:2003. *Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods. Part 6: Critical orifices.*

16. ISO 6145-1:2003. *Gas analysis — Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods — Part 1: Methods of calibration*

17. ISO 6145-7:2009. *Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods. Part 7: Thermal mass-flow controllers.*

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ГЕНЕРАЦІЇ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ТЕРМОІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ

С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський

Розглянуто напрями вдосконалення системи сумішоутворення для термоімпульсного обладнання. Сформульовано вимоги до точності дозування компонент паливної суміші для прецизійної термоімпульсної обробки виходячи з кваліметричних показників крайок прецизійних деталей, встановлених міжнародними стандартами. Виконано огляд методів генерації газової суміші з високоточним співвідношенням компонентів, розглянуто їх особливості, переваги та недоліки стосовно до термоімпульсного обладнання. В якості найбільш перспективного методу для вирішення цього завдання обґрунтовано застосування методу критичних отворів.

Ключові слова: прецизійні деталі, термоімпульсна обробка, генерація високоточних газових сумішей.

APPLICATION PERSPECTIVES OF MODERN METHODS FOR GAS MIXTURES GENERATING TO PRECISION THERMAL PULSE TREATMENT

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

The directions of improving of mixture formation system for thermal pulse equipment are considered. Based on established by international standards qualimetric parameters of precision parts edges the requirements to dosing accuracy of fuel mixture components are formulated for precision thermal pulse treatment. An overview of the methods for gas mixture generating with a high-precision component ratio was examined, its features, advantages and disadvantages were reviewed with regard to thermal pulse equipment were considered. For solving the specified problem the critical hole method as the most promising method is proposed to apply.

Keywords: precision parts, thermal pulse treatment, high precision gas mixtures generating.

Планковский Сергей Игоревич – д-р техн. наук, профессор, декан факультета самолетостроения, 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.

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 Sergey Igorevich – Doctor of Techn. Sci., Professor, Dean of Aircraft Building Faculty, National Aerospace University named by N. E. Zhukovsky "KHAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: s.plank@khai.edu.

Shypul Olga Vladimirovna – PhD, associate professor, associate professor of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University named by N. E. Zhukovsky "KHAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: o.shipul@khai.edu.

Zaklinskiy Sergey Aleksandrovich – Postgraduate student of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University named by N. E. Zhukovsky "KHAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: s.zaklinskiy@khai.edu.