

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТРАКТОВ ГЕНЕРАТОРОВ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ С РАСХОДНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ИХ ПАРАМЕТРАМИ

Ю.И. Евдокименко, науч. сотр., В.М. Кисель, науч. сотр.,

Институт проблем материаловедения НАН Украины, г. Киев,

В.И. Тимошенко, д-р физ.-мат. наук,

Институт технической механики НАН Украины и НКАУ, г. Днепропетровск, Украина

Развитие высокоскоростного газопламенного напыления (ВГПН) потребовало совершенствования тепловой эффективности газодинамических трактов (ГДТ) генераторов высокоскоростных двухфазных потоков.

В существующих системах ВГПН (Jet Kote-23, Top-Gun, Met-Jet, JP-5000) управление потоком газовой фазы, а именно ее ускорение, осуществляется либо воздействием трения в протяженном дозвуковом канале, либо традиционным геометрическим воздействием, либо их комбинацией. При этом процессы нагрева и разгона частиц происходят одновременно при их движении в высокотемпературном потоке продуктов сгорания в канале горелочного устройства (ГУ). ГДТ такой схемы не позволяют в полной мере реализовать энергетический потенциал ВГПН, т.к. условия увеличения скорости и температуры частиц являются взаимоисключающими: для повышения их температуры необходимо увеличивать время нахождения частиц в потоке, а увеличение скорости частиц сокращает время нахождения их в нем. Поэтому во многих случаях не удастся разогнать частицы из тугоплавких материалов до скоростей, необходимых для получения высококачественного покрытия, одновременно расплавив их. Кроме того, в ГДТ традиционной схемы при заданной их геометрии возможности управления характеристиками двухфазного потока ограничены и заключаются лишь в изменении параметров в камере сгорания. Недостатки, присущие традиционному способу, могут быть преодолены при использовании расходного способа управления потоком [1]. Отличительной чертой данного способа является функциональное разделение газодинамического

тракта на участок нагрева частиц в потоке продуктов сгорания, имеющих высокую температуру и невысокую скорость, и участок разгона частиц в сверхзвуковом потоке. Расходный способ управления двухфазным газовым потоком осуществляется за счет подачи компонентов топлива или продуктов сгорания в двух узлах подвода, размещенных на начальном и конечном участках дозвуковой части тракта. Разгон потока до околосвуковой скорости осуществляется во втором узле подвода расходным воздействием, до звуковой – в следующем за ним сопле трения.

Расходный способ предоставляет возможности более гибкого управления характеристиками двухфазного потока за счет варьирования соотношения расходов газовой фазы через узлы подвода, характеризуемого долей расхода высокотемпературного газа, поступающего в поток через первый - передний по потоку - узел подвода, коэффициентом первичного расхода K_{G1} .

При подаче через передний узел подвода 10-50% всего расхода газовой фазы (коэффициент первичного расхода $K_{G1} = 0,1-0,5$) в канале постоянного сечения между узлами подвода устанавливается течение, которое характеризуется невысокой скоростью газового потока, а также его высокими температурой и плотностью (скорость газа соответствует диапазону чисел Маха $(0,06...0,39)M$, температура и плотность газа в потоке составляет соответственно $(0,99...0,98)T_0$ и $(0,99...0,93)\rho_0$), что обеспечивает создание наиболее оптимальных условий для нагрева частиц.

Ввод газовой фазы в узлах подвода горелочного устройства с расходным воздействием на поток (ГУРВ) может осуществляться тремя способами (рис. 1): а - ввод продуктов сгорания из двух незави-

симых камер сгорания (КС); б - ввод продуктов сгорания из общей КС; в - ввод газообразных компонентов топлива и их последующее сжигание непосредственно в канале нагрева.

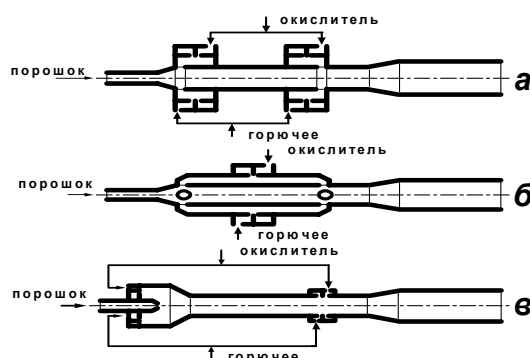


Рис. 1. Компоновочные схемы горелочных устройств с расходным управлением газовым потоком

Предварительный анализ показывает, что схемы (а) и (в) более эффективны при применении газообразных топлив, т.к. позволяют использовать камеры сгорания минимального объема, что уменьшает тепловые потери через их стенки. При использовании жидкого горючего для обеспечения максимальной полноты сгорания оптимальна схема (б).

Процессы, происходящие в ГДТ ГУРВ, являются многопараметрическими, и выбор оптимальных значений определяющих параметров и оптимальных режимов работы устройства должен осуществляться с помощью математического моделирования. Существующие математические модели процессов в трактах горелочных устройств для ВГПН [2, 3] описывают двухфазные течения ГДТ традиционной конфигурации. Эти модели, как правило, не учитывают взаимовлияние фаз, изменение состава газовой фазы вдоль тракта и зависимости теплофизических характеристик двухфазного потока от температуры.

Целью настоящей работы является численное исследование характерных особенностей нагрева и ускорения частиц в тракте ГУРВ.

Двухфазный поток в ГДТ описывается с помощью упрощенной модели [1], основанной на квазиодномерных уравнениях газовой динамики, в которых учтены трение и теплообмен двухфазного потока со стенками канала, а также трение и теплообмен между

фазами. Газовая фаза потока представляет собой продукты сгорания углеводородного топлива, дисперсная фаза – твердые сферические частицы одного размера и состава.

Для описания теплового состояния частиц вводится характеризующий его критерий

$$\eta_t = \frac{\Delta H_p(T) - \Delta H_p(T_m)}{Q_m}, \quad (1)$$

где T_m , Q_m – температура и теплота плавления материала частиц.

Критерий теплового состояния η_t характеризует прирост в процессе нагрева удельной энтальпии материала частиц $\Delta H_p(T)$ относительно теплофизических констант материала $\Delta H_p(T_m)$ (энтальпии при достижении температуры плавления) и Q_m . При значении $\eta_t \geq 1$ частицы находятся в полностью расплавленном состоянии, при значении $\eta_t \leq 0$ – в твердом состоянии. В диапазоне значений $0 \leq \eta_t \leq 1$ критерий численно равен доле расплава в массе частицы.

Для анализа энергетических возможностей процесса ВГПН наряду с критерием теплового состояния предложены критерий кинетического состояния частицы

$$\eta_k = \frac{0,5V^2 - \Delta H_p(T_m)}{Q_m}, \quad (2)$$

и обобщающий критерий энергетического состояния частиц

$$\eta_e = \frac{\Delta H_p(T) + 0,5V^2 - \Delta H_p(T_m)}{Q_m} = \eta_t + \eta_k - \eta_o, \quad (3)$$

$$\text{где } \eta_o = -\frac{\Delta H_p(T_m)}{Q_m},$$

а также тепловой К.П.Д. процесса нагрева и разгона дисперсной фазы в горелочном устройстве

$$\eta = K_{2p}(1 + \alpha\chi) \frac{Q_m}{Q_f} (\eta_e - \eta_o), \quad (4)$$

где K_{2p} – коэффициент двухфазности потока,

α – коэффициент избытка окислителя,

χ – стехиометрическое соотношение топливных компонентов,

Q_f – теплотворная способность топлива.

Критерий энергетического состояния частиц η_e характеризует энтальпию материала частиц при условии перехода всей ее кинетической энергии, определяемой критерием кинетического состояния η_k , в тепловую при соударении с поверхностью.

Математическая модель реализована в виде комплекса программ “Two-Phase” [1], позволяющего исследовать термогазодинамические процессы в трактах ГУ в целях оптимизации их геометрических и режимных параметров по различным критериям.

Для расчетного исследования эффективности концепции расходного управления параметрами газового потока была выбрана схема с подачей газовой фазы в ГДТ генератора двухфазных потоков из двух последовательно расположенных и разнесенных по потоку КС (рис. 1, а). Такая схема в большей степени отвечает предположениям, которые принимаются в физико-математической модели. При отсутствии расхода газовой фазы через вторую КС тракт ГУРВ трансформируется в геометрически эквивалентный тракт ГУ традиционной схемы с комбинированным разгонным каналом, что упрощает сравнение эффективности обеих схем.

ГДТ исследуемого двухкамерного ГУ «Град-К» разработки ИПМ НАНУ имеет следующие геометрические характеристики: диаметры дозвукового и сверхзвукового участков – 8 и 14 мм соответственно; длина узла подвода – 5 мм; длина канала нагрева – 120 мм; длина дозвукового участка разгонного канала – 45 мм; длина сверхзвукового цилиндрического участка – 120 мм; угол раскрытия сверхзвукового конфузора - 12° .

Принимались следующие опорные значения определяющих параметров задачи, характерные для кислородно топливного ВГПН: топливная пара – кислород – водород, давление в передней КС 0,8 МПа; коэффициент избытка окислителя $\alpha = 1,0$; материал твердой фазы – оксид алюминия; дисперсность частиц – 20 мкм; коэффициент двухфазности потока $K_{2p} = 0,1$; коэффициент первичного расхода $K_{G1} = 0,1$; температура охлаждаемых стенок тракта – 500 К.

На рис. 2 приведены расчетные распределения параметров двухфазного потока – скорости (а), температуры (б), давления (в) и критерия теплового состояния частиц (г) – вдоль оси тракта ГУРВ (1) и геометрически эквивалентного ГУ традиционной схемы (2). Сплошными линиями показаны параметры газовой фазы, штриховыми – дисперсной.

Анализ зависимостей на рис. 2 показывает, что ГУРВ и традиционное ГУ отличаются значениями параметров газовой фазы только на участке, соответствующем каналу нагрева ГУРВ ($0,05\text{ м} < X < 0,125\text{ м}$), вдоль остальной части тракта распределения практически идентичны: некоторые различия обусловлены меньшими потерями импульса и энтальпии в канале нагрева из-за меньшей скорости потока в нем.

Характерная скорость в дозвуковом канале в ГУ традиционной схемы – 1000 м/с, в канале нагрева ГУРВ – 110 м/с, после ввода во втором узле подвода остального газа в результате расходного воздействия скорость его возрастает до уровня традиционного ГУ.

В дозвуковом разгонном канале ($0,13\text{ м} < X < 0,175\text{ м}$) под действием работы силы трения скорость газа нарастает до скорости звука. Дальнейшее ускорение геометрическим воздействием в коническом сверхзвуковом сопле приводит к тому, что в его конечном сечении скорость газа достигает своего максимального значения (около 2700 м/с), затем в цилиндрическом разгонном канале происходит ее плавное снижение до 2250 м/с.

Температура газа в дозвуковой части традиционного ГУ из-за охлаждения на его стенке и теплообмена с дисперсной фазой снижается от исходного значения 3340 до 3000 К, в то время, как в канале нагрева ГУРВ - до 2750 К, что связано с существенно меньшим количеством газа, участвующего в теплообмене.

В традиционном ГУ процессы ускорения и нагрева частиц протекают одновременно: в конце дозвукового участка частицы (оксид алюминия, дисперсность – 20 мкм) имеют скорость 710 м/с и температуру 1630 К, а на выходе из устройства, соответственно, 1030 м/с и 1760 К (что менее температуры плавления $T_m = 2327\text{ К}$).

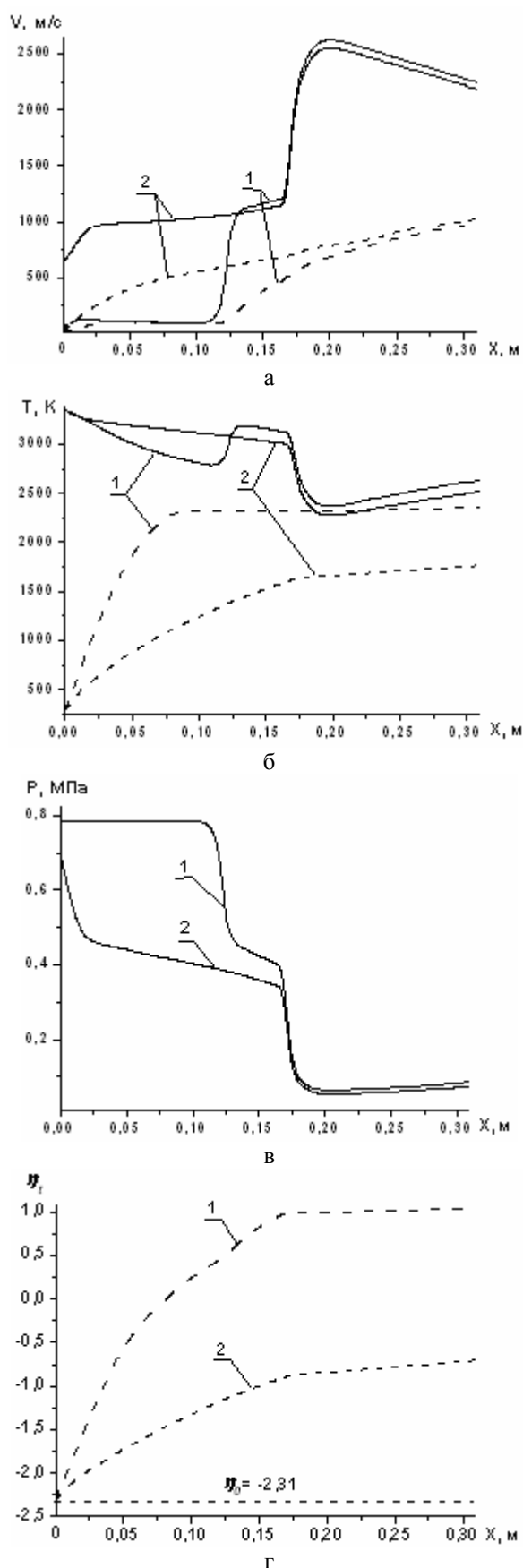


Рис. 2. Распределение параметров двухфазного потока - скорости (а), температуры (б), давления (в) и критерия теплового состояния частиц (г) - вдоль ГДТ кислородно-топливного ГУ при расходном (1) и традиционном (2) воздействии

Скорость частиц дисперсной фазы в конце канала нагрева ГУРВ релаксирует со скоростью потока, а ее среднее значение на этом участке менее 100 м/с. К моменту истечения частицы имеют скорость 990 м/с. Они достигают температуры плавления примерно на середине канала нагрева ($X=0,08$ м) и к концу дозвукового участка находятся в полностью расплавленном состоянии (критерий теплового состояния $\eta_t = 1$). В сверхзвуковой части тракта частицы находятся в тепловом равновесии с газом и их тепловое состояние не меняется: в выходном сечении частицы представляют собой жидкие капли с температурой, несколько (на 30°) превышающей температуру плавления.

Таким образом, сравнение энергетических параметров частиц в двух рассмотренных случаях показывает, что при практически несущественной разнице скоростей истечения достигнутая энтальпия частиц в ГУРВ более чем вдвое превышает достигнутую в эквивалентном ГУ традиционной схемы: значения теплового критерия η_t при начальном значении $\eta_0 = -2,31$ составляют соответственно 1,04 и $-0,71$. Этому способствует два фактора:

- 1) время нахождения частиц в дозвуковой части ГУРВ примерно вчетверо больше, чем в такой же части традиционного тракта (0,46 и 1,90 мс соответственно);
- 2) плотность газа, в значительной степени влияющая на межфазный теплообмен, в канале нагрева почти вдвое выше, на что указывает более высокое давление в потоке.

Эти факторы оказываются более существенными, чем два других, негативно влияющих на нагрев частиц в канале нагрева: снижение скорости скольжения фаз и более интенсивное охлаждение газа в нем.

На рис. 3 приведены расчетные зависимости значений критерия теплового состояния η_t (сплошные линии) и энергетического критерия η_e (штриховые линии) частиц в выходном сечении ГУРВ от коэффициента первичного расхода K_{G1} и дисперсности частиц Al_2O_3 (1 – 10 мкм; 2 – 20 мкм; 3 – 30 мкм;

4 – 40 мкм) при опорных значениях параметров ВГПН и коэффициенте двухфазности $K_{2p} = 0,2$.

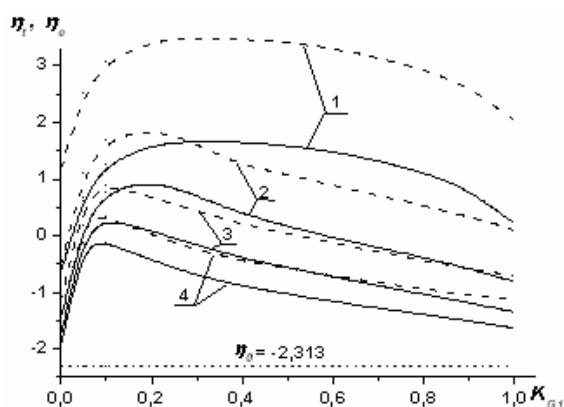


Рис. 3. Расчетные зависимости энергетических параметров частиц в выходном сечении ГУРВ от коэффициента первичного расхода K_{G1} и их дисперсности

- 1 – 10 мкм;
- 2 – 20 мкм;
- 3 – 30 мкм;
- 4 – 40 мкм

Анализ зависимостей (см рис. 3) показывает, что с увеличением дисперсности частиц оксида алюминия оптимальное значение коэффициента K_{G1} , обеспечивающее максимальную тепловую эффективность устройства, смещается в сторону меньших значений (от $K_{G1} = 0,3$ при дисперсности 10 мкм до $K_{G1} = 0,1$ при 40 мкм). Для частиц, достигающих температуры плавления (в данном случае менее 35 мкм) и представляющих наибольший интерес с точки зрения получения покрытий, оптимум K_{G1} находится в диапазоне $K_{G1} = 0,1 \dots 0,2$. Вклад кинетической составляющей в суммарное энергетическое состояние оказывается существенным только для достаточно мелких частиц, находящихся к моменту выхода из горелки в стадии плавления вследствие нагрева (~ 32% и 22%) для частиц дисперсностью 10 и 20 мкм соответственно. Для частиц размером 40 мкм этот вклад не превышает 18%, но этого оказывается достаточно для нагрева при ударе частицы на 50° и перевода в расплавленное состояние ~30% ее массы.

Представленные зависимости позволяют также сравнить тепловые эффективности двухкамерной го-

релки при различных значениях коэффициента K_{G1} и геометрически эквивалентной традиционной горелки ($K_{G1} = 1$). Сравнение значений критерия теплового состояния позволяет сделать вывод, что преимущество двухкамерной схемы в достигаемой энтальпии частиц возрастает с увеличением их дисперсности – для указанных на рис. 3 размеров частиц максимальный выигрыш в приросте энтальпии составляет соответственно 37, 55, 63 и 69%.

Тепловой К.П.Д. ГУРВ, рассчитанный по формуле (4), составляет для частиц размером 10 мкм ~ 21%, 20 мкм - 15%, 30 мкм – 11% и 40 мкм – 9%.

Можно констатировать, что разработанный газодинамический тракт с расходным воздействием на параметры газового потока отличается высокой тепловой эффективностью и при напылении мелкодисперсного порошка оксидной керамики вдвое превосходит традиционный, при этом энергетические параметры частиц оксида алюминия в максимальной степени соответствуют необходимым условиям получения высококачественных покрытий.

Литература

1. Моделирование высокотемпературных двухфазных потоков / И.С. Белоцерковец, В.П. Галинский, Ю.И. Евдокименко, В.Х. Кадыров, В.М. Кисель, В.И. Тимошенко // Материалы и покрытия в экстремальных условиях.– М.: МГТУ, 2002.– Т. 3.– С. 113-153.
2. Yang X., Eidelman S., Lottati I. Proc. 8th Nat. Thermal Conf., Houston, TX, August, 1995.– P. 213-218.
3. Tawfik H.H., Zimmerman F. // J. Therm. Spray Technol.– 1997.– Vol. 6, № 3.– P. 1-8.

Поступила в редакцию 01.06.03

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Б.П. Урюков, Институт проблем материаловедения им. И.М. Францевича, г. Киев; канд. техн. наук, доц. каф. ракетных двигателей А.М. Грушенко, НАКУ, г. Харьков.