

УДК 533.6.01+621.793

**Ю.И. ЕВДОКИМЕНКО, В.М. КИСЕЛЬ, Г.А. ФРОЛОВ***Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича Национальной академии наук Украины, Киев, Украина***ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОРЕЛОК  
ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

*Повышение энергетической эффективности горелок для высокоскоростного газопламенного напыления (ВГПН) является основной задачей их совершенствования. Предложена методика оценки энергетической эффективности горелок для ВГПН, в качестве критериев которой приняты условная энтальпия торможения дисперсной фазы и условный КПД горелки, определяемый долей химической энергии топлива, преобразуемой в тепловую и кинетическую энергию дисперсной фазы. Рассмотрена эффективность сопловых каналов различной конфигурации существующих горелок. Показано, что при равной тепловой мощности каналы с дозвуковым течением имеют большую длину и обеспечивают более эффективный нагрев частиц, а со сверхзвуковым – более эффективный их разгон, при этом энергетическая эффективность последних оказывается существенно меньшей. Комбинированные каналы, состоящие из протяженных цилиндрических до- и сверхзвуковых участков, обладают энергетической эффективностью близкой к таковой дозвуковых каналов при скорости частиц, превосходящей достигаемую в сверхзвуковых каналах. Показано, что максимальной энергетической эффективностью обладает газодинамический тракт с расходным управлением параметрами газового потока, обеспечивающий максимальные значения температуры и скорости частиц.*

**Ключевые слова:** высокоскоростное газопламенное напыление, горелка, энергетическая эффективность горелки, энергетическое состояние частиц, газодинамическая схема горелки, условный к.п.д. горелки.

**Введение**

Высокоскоростное газопламенное напыление (ВГПН), появившееся как промышленная технология в середине восьмидесятых годов прошлого века, развилось в один из основных методов газотермического напыления и расширяет свое присутствие на рынке этих услуг [1, 2]. Все это время схемные решения горелок для ВГПН совершенствовались с целью повышения эффективности процесса напыления и расширения круга напыляемых материалов, в который сегодня входят практически все материалы, наносимые газотермическими методами.

Одним из главных путей совершенствования горелок для ВГПН является повышение их энергетической эффективности, которая, очевидно, определяется долей располагаемой после сжигания топлива энергии, идущей на разгон и разогрев напыляемых частиц, т.е. на достижение частицами определенного энергетического состояния.

**1. Критерии энергетической  
эффективности горелок для ВГПН**

Тепловое состояние частиц дисперсной фазы в процессе нагрева определяется приростом ее удельной энтальпии  $\Delta h_p(T_p)$ . Скорость частиц  $V_p$ , достигаемая при разгоне, определяет ее удельную кинетическую энергию  $E_k = 0,5 V_p^2$ . Таким образом,

суммарная энергия, приобретаемая дисперсной фазой в процессе ее энергообмена с газовой фазой, на единицу ее массы составляет  $\Delta h_p(T_p) + 0,5 V_p^2$ . Эта величина является аналогом удельной энтальпии торможения газовой фазы и определяет тепловое состояние частиц при высокоскоростном соударении с преградой при условии преобразования всей ее кинетической энергии в тепловую. Ее удобно характеризовать критерием энергетического состояния частиц  $K_e$ , нормирующим ее относительно теплофизических констант материала дисперсной фазы таким образом, что значение  $K_e = 0$  соответствует удельной энтальпии  $\Delta h_p(T_m)$  кристаллической фазы материала частицы при температуре плавления  $T_m$ , а значение  $K_e = 1$  – удельной энтальпии расплава при этой же температуре. Тогда значения в диапазоне  $0 \leq K_e \leq 1$  соответствуют удельным энтальпиям материала в процессе плавления и численно равны доле расплава в массе частиц, при  $K_e < 0$  и  $K_e > 1$  – удельным энтальпиям частиц в твердом состоянии и состоянии перегретого расплава, соответственно [3].

Выраженная в процентах, доля подведенной в камеру сгорания горелки энергии топлива, преобразуемой в тепловую и кинетическую энергию дисперсной фазы, может трактоваться как условный к.п.д. горелки  $\eta_{гор}$  [4], характеризующий эффективность горелки при нагреве и разгоне частиц с определенной динамической и тепловой инерционностью.

## 2. Расчет энергетической эффективности горелок разных газодинамических схем

Конфигурация соплового канала и место ввода дисперсной фазы в газовый поток являются основными факторами, определяющими эффективность межфазного энергообмена в горелке для ВГПН. В данной работе рассматриваются горелки, предназначенные для нанесения покрытий из порошковых материалов. Ввод дисперсной фазы в газовый поток продуктов сгорания может быть осевым, т.е. направленным в сопло по его оси, или радиальным, когда подача его происходит через радиальные отверстия в стенке соплового канала. На рис. 1 приведены основные схемы сопловых каналов промышленных горелок для ВГПН и возможные расположения на них мест ввода порошка (А – Г) и перспективного тракта двухкамерной горелки (Д).



Рис. 1. Схемы сопловых каналов горелок для ВГПН и места ввода в них напыляемого материала

Было проведено расчетное сравнение энергетической эффективности этих схем, в котором расчет параметров двухфазного потока проводился по методике [3] для случая: топливо – керосин-кислород при стехиометрическом соотношении компонентов и давлении в КС 1,0 МПа, дисперсная фаза – частицы диоксида циркония ( $T_m = 2983\text{К}$ ) диаметром 25 мкм. Значение коэффициента двухфазности потока было принято  $K_{2p} = 0,01$ , что позволяет пренебречь влиянием дисперсной фазы на параметры газового потока и рассматривать полученные ее параметры как максимально возможные для данного канала и заданного режима работы.

Методологической особенностью расчета является проведение его при фиксированной тепловой мощности устройств – 156 кВт, что соответствует расходу горючего 3,65 г/с. Постоянство расхода компонентов обеспечивалось варьированием диаметров критического сечения для каждой из схем. В

расчете предполагался осевой ввод дисперсной фазы, т.к. в этом случае дистанция нагрева и ускорения частиц всегда больше, чем при радиальном вводе, соответственно, выше их конечные температура и скорость. Точка ввода располагалась на расстоянии 15 мм от входа в канал и принималась за точку отсчета длины канала  $L_x$ . Длины каналов выбраны максимально возможными с учетом ограничений, накладываемых потерями энергии и давления газовой фазы за счет охлаждения и трения на стенках канала, а также условием недопустимости снижения давления в сверхзвуковом потоке ниже минимального экспериментально определенного значения 0,07 МПа.

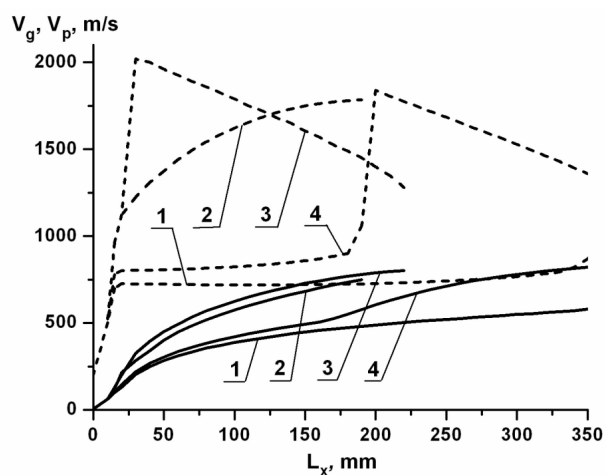
В табл. 1 показаны расчетные значения геометрических параметров рассматриваемых каналов (диаметра критического сечения  $D_{кр}$ , общей длины  $L_{\Sigma}$ ), полуугла раскрытия конического участка  $\beta$ , энергетических параметров частиц на выходе из них (скорости  $V_p$ , температуры  $T_p$  и критерия энергетического состояния частиц  $K_e$ ), а также потери на охлаждение при температуре стенки 600К  $Q_{охл}$ .

Таблица 1  
Результаты расчета энергетической эффективности сопловых каналов различных схем

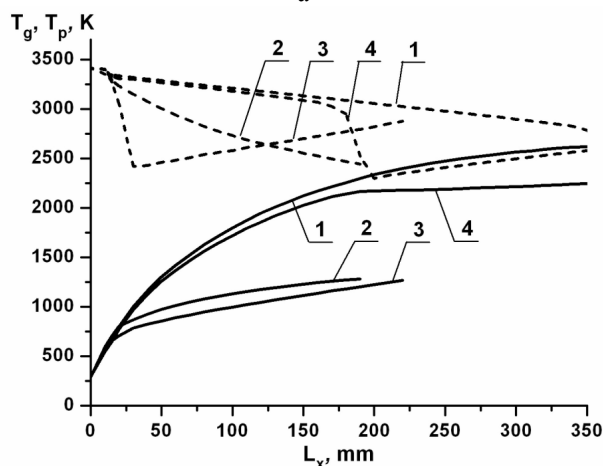
Схема канала	$D_{кр}$ , мм	$L_{\Sigma}$ , мм	$\beta$ , град	$V_p$ , м/с	$T_p$ , К	$K_e$	$Q_{охл}$ , кВт
А	6,82	350	–	574	2628	–0,1	14,88
Б	6,60	190	0,75	749	1279	–1,07	5,49
В	6,59	220	7	803	1248	–1,06	5,51
Г	6,70	350	7	829	2251	–0,18	12,43
Д	6,46	360	7	837	2853	0,36	10,07

На рис. 2 и 3 показаны распределения параметров двухфазного потока вдоль сопловых каналов схем А, Б, В и Г, которым на графиках соответствуют кривые 1, 2, 3 и 4, соответственно.

На рис. 4 показано расчетное распределение параметров двухфазного потока по длине устройства схемы Д при тех же условиях и подаче через первую КС 20% всего расхода газовой фазы. Скорости потока  $V_g$  и частиц  $V_p$  нормированы относительно максимальной скорости потока в устройстве  $V_{gmax} = 1930$  м/с (кривые 1, 2 на рис. 4), температура потока  $T_g$  и температура частиц  $T_p$  нормированы относительно начальной температуры в КС  $T_{cc} = 3430\text{К}$  (кривые 3, 4), давление в потоке  $P$  – относительно начального давления в КС  $P_{cc} = 1,0$  МПа (кривая 5). Комплекс  $(K_e - K_{e0}) / (K_{emax} - K_{e0})$  характеризует критерий энергетического состояния частиц  $K_e$ , позволяя в диапазоне  $[0, 1]$  представить его изменение от начального значения  $K_{e0} = -2,23$  до максимально достигаемого в выходном сечении канала значения  $K_{emax} = 0,36$  (кривая 6).



а



б

Рис. 2. Распределение параметров двухфазного потока по длине сопловых каналов горелок различных схем: а – скоростей частиц  $V_p$  и газа  $V_g$ ; б – температур частиц  $T_p$  и газа  $T_g$ .

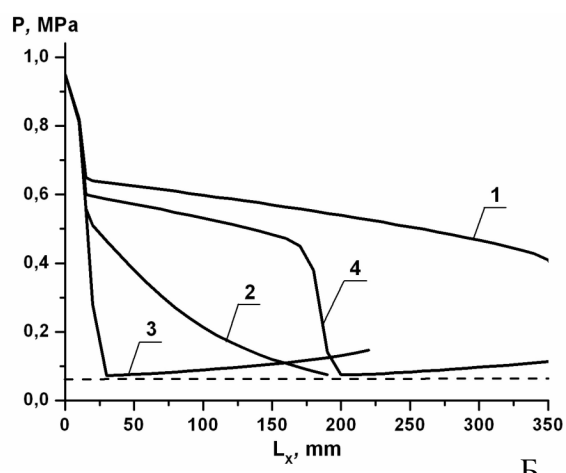
Сплошные линии обозначают параметры частиц, штриховые линии – параметры газа

Для оценки эффективности горелок с каналами А, В, Г и Д в условиях режима напыления расчеты были повторены при условии реального значения коэффициента двухфазности  $K_{2p} = 0,07$  и потери 20 % энтальпии продуктов сгорания в КС до подачи дисперсной фазы, что соответствует экспериментально определенной величине тепловых потерь в горелках для ВКТН, работающих на жидком топливе [2]. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

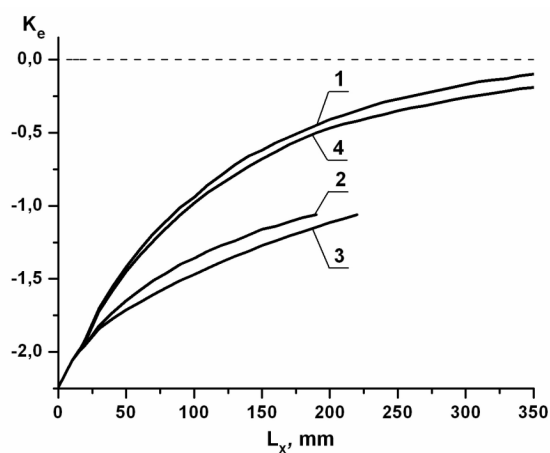
Таблица 2

Результаты расчета энергетической эффективности сопловых каналов различных схем

Схема канала	$V_p$ , м/с	$T_p$ , К	$K_e$	$\eta_{гор. \%}$
А	526	2440	-0,30	7,52
В	763	1275	-1,1	4,38
Г	767	2120	-0,36	7,27
Д	783	2625	0,10	9,04



а



б

Рис. 3. Распределение параметров двухфазного потока по длине сопловых каналов горелок различных схем: а – давления в потоке  $P$  (штриховая линия – давление 0,07 МПа); б – критерия энергетического состояния частиц  $K_e$  (штриховая линия соответствует удельной энтальпии материала при достижении температуры плавления)

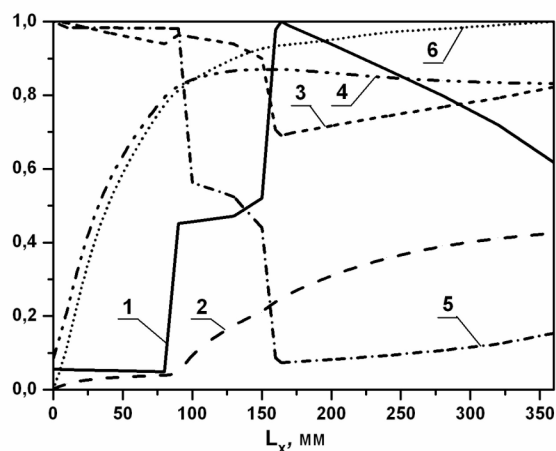


Рис. 4. Распределение параметров двухфазного потока вдоль тракта двухкамерной горелки с расходным управлением параметрами потока

### 3. Анализ полученных результатов

Цилиндрический сопловой канал (схема А на рис. 1) не имеет физического ограничения своей длины, поток в нем имеет дозвуковую скорость, начальный уровень которой тем ниже, чем длиннее канал, и достигает скорости звука в выходном сечении. Технически длина канала ограничена охлаждением потока ниже требуемой температуры нагрева частиц. Из графиков скоростей и температур на рис. 2 видно, что схема А обеспечивает максимальное среди всех представленных на них схем время пребывания частиц в канале (в данном случае оно составляет 1,02 мс) и максимальную среднюю по длине канала температуру несущего потока. Хотя в этой схеме потери в систему охлаждения максимальны, условия течения обеспечивают наибольшую среди традиционных каналов эффективность нагрева частиц дисперсной фазы, достигаемую ценой наименьшей эффективности их разгона. Тем не менее дозвуковой цилиндрический канал обеспечивает максимальную среди них передачу энергии дисперсной фазе, о чем свидетельствуют максимальные значения критерия энергетического состояния частиц и условного к.п.д. Сопловые каналы такого типа длиной до 305 мм (12") применяются в горелках для ВКТН серии Jet Kote (компании Deloro Stellite, США), предназначенных для напыления оксидов и других тугоплавких материалов [2].

В сопловых каналах схем Б и В уже в самом их начале (критическое сечение располагается при  $L_x = 20$  мм) скорость газового потока достигает скорости звука (1123 м/с при данных условиях в КС) и в дальнейшем на всем протяжении канала она остается сверхзвуковой. Длина протяженного конического канала (схема Б) определяется углом конусности канала и при заданном значении давления в КС геометрически ограничена диаметром выходного сечения, в котором достигается максимально допустимое перерасширение потока (штриховая линия на рис.3, а). В результате длина такого канала оказывается минимальной среди всех схем, так же как и его энергетическая эффективность. Тем не менее, подобными каналами малой длины оснащены популярные в промышленности горелки серии Diamond Jet Hybrid (Sulzer Metco, США) [2].

Длина соплового канала, состоящего из короткого конического и протяженного цилиндрического участков (схема В), ограничена возможностью существования сверхзвукового течения в канале постоянного сечения. В таком потоке вследствие трения происходит интенсивное торможение потока, сопровождающееся ростом давления в потоке и одновременным быстрым снижением давления торможения, что приводит к скачкообразному пере-

ходу течения в дозвуковое при достижении отношением этих давлений значения менее критического перепада (для продуктов сгорания  $(P^0/P)_{кр} < 1,8$ ). Для каналов этой конфигурации характерно наличие зоны разрежения за коническим участком, в которой давление менее 0,1 МПа (в данном случае это – участок  $L_x$  [30, 130] мм кривой 3 на рис. 3, а) и в которую возможна радиальная безнапорная подача дисперсной фазы за счет эжекции высокоскоростным потоком, что является важным технологическим достоинством схемы. Из-за высокой эффективности разгона частиц такие каналы установлены на наиболее современных жидкотопливных горелках для ВКТН серии Woka (Sulzer Metco) и JP5220 (Praxair, США), предназначенных для напыления твердыми частицами за счет пластичной деформации при высокоскоростном соударении [2].

Обе схемы сверхзвуковых каналов обеспечивают примерно равную энергетическую эффективность, весьма уступающую остальным схемам.

Сопловой канал схемы Г является комбинацией дозвукового и сверхзвукового цилиндрического каналов, соответственно, распределения параметров двухфазного потока в обеих его частях близки к распределениям параметров на соответствующих участках каналов схем А и В. Так как дозвуковой канал в нем короче, чем в схеме А, то скорость газа, а значит, и частиц в нем несколько выше, их температура – ниже, а давление снижается более интенсивно. Падение давления в дозвуковой части канала снижает степень расширения в коническом сверхзвуковом сопле, поэтому максимальная скорость газа в таком канале ниже достигаемой в канале схемы В, а кризис сверхзвукового течения происходит на меньшей длине, ограничивая общую длину канала. Скорость частиц на выходе – максимальная среди традиционных схем, а их температура уступает лишь достигаемой в дозвуковом канале, при этом по энергетической эффективности канал оказывается соизмерим с ним. В расчете были приняты равные длины до- и сверхзвуковых участков канала, но очевидно, что за счет варьирования их соотношения возможно регулирование параметров частиц в широком диапазоне значений.

Дальнейшее повышение энергетической эффективности в горелках для ВГПН связано с применением газодинамических трактов с функционально выделенным участком нагрева частиц дисперсной фазы, в котором газовая фаза имеет максимально возможную для данной топливной композиции температуру и невысокую скорость, т.е. поток имеет параметры, близкие к параметрам в КС. Выделение участка нагрева может достигаться организацией подачи порошка непосредственно в КС или применением схемы с двумя последовательно установлен-

ными КС (схема Д на рис. 1). Во втором случае осуществляется расходное управление параметрами двухфазного потока, позволяющее достичь на выходе горелки в 1,5 – 2 раза более высокой удельной энтальпии дисперсной фазы, чем при использовании канала схемы Г [5].

Распределение параметров потока в канале Д (рис. 4) характеризует функциональное различие участков газодинамического тракта в процессах нагрева и разгона частиц. В канале между камерами сгорания (канале нагрева) скорость газа изменяется в диапазоне 108 – 92 м/с, его температура – в диапазоне 3430К – 3223К, давление – 0,984 – 0,981 МПа, что вполне соответствует параметрам в КС. Скорость частиц дисперсной фазы на участке нагрева возрастает до 78 м/с, за время его прохождения (1,8 мс) происходит их интенсивный нагрев до температуры 2792К. После подачи из второй КС (в сечении  $L_x = 90$  мм) остального газа с температурой 3430К за счет расходного воздействия скорость газа возрастает до 885 м/с, температура – до 3305К. В дальнейшем изменение параметров газа становится подобным происходящему в канале схемы Г. В конце дозвукового цилиндрического канала ( $L_x = 150$  мм) температура частиц достигает температуры плавления диоксида циркония, их скорость – 412 м/с. В сверхзвуковом коническом сопле температура потока резко падает до 2370К в его конце ( $L_x = 164$  мм), и в сверхзвуковом канале остается ниже температуры частиц, вызывая их охлаждение до значения 2852К в выходном сечении канала. Сверхзвуковой участок длиной 210 мм частицы пролетают за 0,32 мс, а весь тракт устройства длиной 360 мм – за 2,38 мс. При соизмеримых общих длинах в тракте схемы Д нагрев частиц длится вдвое дольше, чем в канале схемы А, результатом чего оказывается более высокая их температура, достигаемая к тому же без ущерба для их ускорения.

### Выводы

1. Каналы с дозвуковой скоростью несущего газового потока обеспечивают более эффективный нагрев частиц, а каналы со сверхзвуковой скоростью потока – более эффективное их ускорение, при этом эффективность нагрева тем выше, чем ниже скорость несущего газового потока, а эффективность ускорения – чем она выше. В рассмотренном модельном случае температура частиц на выходе дозвукового канала постоянного сечения более чем вдвое выше, чем на выходе сверхзвукового, но при этом их скорость на треть ниже.

2. Сверхзвуковые каналы, состоящие из короткого расширяющегося конического сопла со степенью расширения, обеспечивающей максимальное перерасширение потока (до давления 0,07 МПа), и цилиндрического ствола с длиной несколько меньшей той, на которой происходит кризис течения, обладают большей эффективностью ускорения частиц, чем протяженные конические каналы.

3. Комбинированные каналы, состоящие из протяженных до- и сверхзвуковых участков, позволяют отношением длин этих участков варьировать температуру частиц примерно в пределах значений, достигаемых в до- и сверхзвуковых каналах, обеспечивая при этом более высокую их скорость.

4. Функциональное разделение участков нагрева и ускорения дисперсной фазы посредством разнесенного по тракту расходного воздействия на параметры потока обеспечивает передачу ей большей как тепловой, так и кинетической энергии. При нагреве и ускорении дисперсной фазы, состоящей из частиц диоксида циркония размером 25 мкм, при уровне тепловой мощности горелки 156 кВт энергетическая эффективность тракта предложенной конфигурации на 20 % превосходит максимальную эффективность, достигаемую в традиционно применяемых сопловых каналах, обеспечивая при этом не только более высокую температуру частиц (на 185°), но несколько более высокую их скорость.

### Литература

1. *Газотермическое напыление: Учебное пособие / под ред. Л.Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.*
2. *Thermal Spraying for Power Generation Components / K.E. Schneider, V. Belashchenko et al. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2006. – 271 p.*
3. *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.: Изд-во МГТУ, 2002. – Т. 3. – С. 113-153.*
4. *Евдокименко Ю.И. Исследование газодинамических трактов генераторов двухфазных потоков с расходным управлением их параметрами / Ю.И. Евдокименко, В.М. Кисель, В.И. Тимошенко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2003. – Вип. 6 (41). – С. 69-73.**
5. *Высокоскоростное газопламенное напыление двухкамерными горелочными устройствами / Ю.И. Евдокименко, В.М. Кисель и др. // Порошковая металлургия. – 2003. – № 11/12. – С. 45-54.*

Поступила в редакцию 31.05.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., ведущий научный сотрудник Б.А. Урюков, ИПМ НАНУ, Киев, Украина.

## ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПАЛЬНИКІВ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ГАЗОПОЛУМЕНЕВОГО НАПИЛЕННЯ

*Ю.І. Євдокименко, В.М. Кисіль, Г.О. Фролов*

Підвищення енергетичної ефективності пальників для високошвидкісного газополуменевого напилення (ВГПН) є основною задачею їх удосконалення. Запропоновано методику оцінки енергетичної ефективності ВГПН-пальників, у якості критеріїв якої прийняті умовна ентальпія гальмування дисперсної фази та умовний коефіцієнт корисної дії пальника, якій визначається долею хімічної енергії палива, яка перетворюється в процесі міжфазового енергообміну в теплову і кінетичну енергію дисперсної фази. Розглянуто ефективність соплових каналів різної конфігурації існуючих ВГПН-пальників. Показано, що при рівній тепловій потужності канали з дозвуковою течєю мають більшу довжину та забезпечують більш ефективне нагрівання частинок, а з надзвуковою – більш ефективний їх розгін, при цьому енергетична ефективність останніх є суттєво меншою. Комбіновані канали, які складаються з протяжних циліндричних до- та надзвукових ділянок, мають енергетичну ефективність близьку до такої дозвукових каналів при швидкості частинок, яка перевищує ту, що досягається у надзвукових каналах. Показано, що максимальну енергетичну ефективність має газодинамічний тракт з витратним керуванням параметрами газового потоку, якій забезпечує максимальне значення температури та швидкості частинок.

**Ключові слова:** високошвидкісне газополуменеве напилення, пальник, енергетична ефективність пальника, енергетичний стан частинок, газодинамічна схема пальника, умовний к.к.д. пальника.

## THE ENERGY EFFICIENCY OF BURNERS FOR HIGH-VELOCITY GAS-FLAME SPRAYING

*Y.I. Yevdokimenko, V.M. Kysil, G.A. Frolov*

Increase of energy efficiency of burners for high velocity gas-flame (HVGFS) spraying is the primary goal of improvement them. A criterion for assessing the energy efficiency HVGFS-burner in the form of a conditional efficiency is proposed. As criteria of energy efficiency of HVGFS-burner a particles conditional total enthalpy is accepted. Burner energy efficiency determines by the part supplied energy, which was converted into heat and kinetic energy of the dispersed phase. The effectiveness of the nozzle channels of various configurations of existing HVGFS-burners is considered. It is shown that under equal thermal power feeds from subsonic flows are long provide more efficient heating of the particles, and the supersonic – more effective to disperse them, and the energy efficiency of the latter is much smaller. Combined channels, consisting of long cylindrical subsonic and supersonic regions, have energy efficiency nearly equal to that of subsonic channel at a velocity of particles, exceeding attainable supersonic channels. It is shown that the maximum energy efficiency has a gas-dynamic channel with consumption control parameters of the gas flow, which provides maximum temperature and velocity.

**Key words:** high-velocity flame spraying, burner, energy efficiency, burners gas-dynamic configuration, conditional coefficient of efficiency of burner.

**Євдокименко Юрій Ігоревич** – научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича Национальной академии наук Украины, Киев, Украина, e-mail: yevd@meta.ua.

**Кисель Вячеслав Михайлович** – научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича Национальной академии наук Украины, Киев, Украина, e-mail: vyacheslav.kysil@gmail.com.

**Фролов Геннадий Александрович** – д-р техн. наук, заведующий отделом Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича Национальной академии наук Украины, Киев, Украина, e-mail: g\_frolov@nbi.com.ua.