

УДК 621.793.71

*Харламов Ю. А., Петров П. А., Изюмов Ю. В., Орлов А. А.
Донбасский государственный технический университет*

ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Статья посвящена систематизации и сравнительному анализу конструктивных особенностей и схем детонационных камер сгорания с переменным сечением, используемых в установках для детонационно-газового напыления покрытий и других видов обработки, преимущественно дисперсных материалов, их систематизации и поиску путей их совершенствования. Импульсные (детонационные) камеры сгорания (ДКС) являются важнейшим блоком детонационно-газовых установок и предназначены для циклического сжигания горючих смесей газов и создания импульсных высокоскоростных потоков продуктов детонации и их взаимодействия с частицами порошка напыляемого материала с формированием напылительных гетерогенных струй. ДКС с переменным сечением обладают комплексом технологических преимуществ и, прежде всего, реализацией горения в режиме пересжатой детонации, повышением скорости и температуры напыляемых частиц и улучшением свойств получаемых покрытий. Рассмотрены четыре основные группы ДКС с переменным сечением: с переменными площадью и размерами поперечного сечения по длине; с переменными формой, площадью и размерами поперечного сечения по длине; с переменными положениями осей поперечного сечения по длине (закрученные ДКС); с плавным изменением формы, площади и размеров поперечного сечения по длине. Приведены примеры таких ДКС, преимущества и недостатки.

Ключевые слова: *детонационные камеры сгорания, продукты детонации, детонационные волны, профилированные камеры, газовые смеси, напыляемые частицы.*

Введение. Высокая энергетическая эффективность детонационного горения обусловила интенсивный поиск его практического применения [1, 2], в том числе для напыления покрытий. Детонационно-газовое напыление явилось первым практическим применением газовой детонации, а также первым высокоскоростным методом газотермического напыления (ГТНП), обеспечившим резкое улучшение свойств газотермических покрытий (ГТП). Разработано в конце 1950-х в США, а в 1970-е годы самостоятельно развивалось в СССР и странах СНГ [3–5]. Детонационно-газовые установки (ДГУ) представляют собой довольно сложные технические системы. Основной подсистемой ДГУ, оказывающей определяющее влияние на процесс напыления, является импульсная (детонационная) камера сгорания (ДКС), где организуется регулярное импульсное (пульсирующее) сжигание газовой смеси, нагрев и ускорение частиц порошка, формирующих напы-

лительную струю. Преимущественная доля исследований газовой детонации проведена для условий протекания в прямых каналах и трубах, поэтому ДКС ДГУ на начальном этапе их развития применяли в виде прямых каналов, причем при использовании для напыления легко детонирующих газовых смесей. Дальнейшее развитие технологии детонационно-газового напыления покрытий (ДГНП) требует расширения номенклатуры напыляемых материалов, не исключена возможность перехода на дешевые, но трудно детонирующие газовые смеси. Это обуславливает целесообразность анализа и поиска новых конструктивных схем ДКС, прежде всего для улучшения условий формирования покрытий с требуемыми свойствами, создания композиционных и других видов покрытий нетрадиционного строения, структуры и свойств. Анализ основных схем ДКС приведен в работах [6–8]. Быстрое развитие теории детонационного горения и практики его приме-

нения существенно расширяет возможности разработки конструкций ДКС, более полно отвечающих технологическим требованиям получения высококачественных покрытий. Для увеличения параметров продуктов детонации (ПД) перспективно применение пересжатых детонационных волн (ДВ). Даже небольшое увеличение скорости ДВ приводит к резкому росту таких параметров продуктов детонации (ПД), как давление, плотность, массовая скорость. Пересжатые ДВ могут быть генераторами импульсных потоков ПД с параметрами, заметно превышающими те, которые можно получить при самоподдерживающемся режиме детонации Чепмена-Жуге (ЧЖ) [8]. При переходе детонации из широкой трубы в узкую детонация может усиливаться и распространяться в пересжатом режиме. Пересжатые ДВ конструктивно просто получать путем уменьшения поперечного сечения трубы. Одним из таких перспективных направлений является разработка ДКС переменного сечения.

Целью данной статьи являются систематизация и сравнительный анализ конструктивных особенностей и схем детонационных камер сгорания с переменным сечением, используемых в установках для детонационно-газового напыления покрытий и других видов обработки, их систематизация и поиск путей их совершенствования.

Основные результаты исследования. По конструктивным особенностям различают детонационные камеры сгорания (ДКС): прямые, изогнутые, разветвляющиеся, прямые с обоими открытыми торцами, петлеобразные, U-образные, многокамерные с общей камерой зажигания, кольцевые, спиральные, многосекционные и др.; находят также применение ДКС с переменным поперечным сечением [6–8]. Нами выделены четыре группы таких ДКС:

1) ДКС с переменными площадью и размерами поперечного сечения по длине;

2) ДКС с переменными формой, площадью и размерами поперечного сечения по длине;

3) ДКС с переменными положениями осей поперечного сечения по длине (закрученные ДКС);

4) ДКС с плавным изменением формы, площади и размеров поперечного сечения по длине.

Детонационные камеры сгорания с переменными площадью и размерами поперечного сечения по длине. На начальном этапе развития ДГНП применяли ДКС, которые в литературе по ГТНП именуют термином «стволы», с постоянным поперечным сечением диаметром 20...25 мм и длиной 1,0...2,0 м (рис. 1, *a*). Источники инициирования горения обычно располагаются вблизи закрытого торца ДКС или сопряженных с ним камер зажигания. Применяют также различные схемы ввода напыляемого порошка в разгонную часть как со стороны закрытого торца (осевая подача), так и поперечную непосредственно в зону разгона. Различают стволы с постоянным по длине поперечным сечением, изменяющейся по длине площадью поперечного сечения (резко или плавно), изменяющейся по длине формой поперечного сечения, а также формой и площадью поперечного сечения. Одной из таких конструкций, описанной в а. с. СССР № 513728, является ступенчатый ствол, состоящий из двух цилиндрических ступеней разного диаметра (рис. 1, *b*), расположенных в порядке уменьшения поперечного сечения (ПС) по направлению истечения продуктов детонации. По мнению авторов, за счет возникновения отраженных волн на переходе ступеней увеличивается удельная энергия потока продуктов детонации. При входе в ступень с наименьшим диаметром d отраженная от торцевой стенки ДВ движется навстречу потоку ПД, оставляя за своим фронтом ПД с более высокими параметрами, чем до отражения. При четырехкратном уменьшении площади поперечного сечения и использовании смеси ацетилена с кислородом в соотношении 1:1 увеличиваются параметры ПД в выходной секции до давления 6,8 МН/м² и температуры около 5150 К. Увеличивается также скорость ПД и время пребывания в

них частиц порошка. Однако увеличение диаметра D входной секции увеличивает преддетонационное расстояние, или необходимо использовать более мощные источники инициирования горения.

Аналогичная схема ДКС использована в а. с. СССР № 1827872. Для увеличения длительности истечения ПД и пребывания в них частиц порошка увеличивается длина ступеней ДКС, для лучших условий истечения ПД ступени могут сопрягаться кони-

ческим переходником (рис. 1, с). При увеличении D уменьшаются удельные (на единицу массы) потери энергии ПД на трение и теплоотвод в стенки ствола. С другой стороны, с уменьшением отношения d/D увеличиваются потери энергии ПД за счет интенсификации пульсационных процессов в камере сгорания, возникающих при последовательном отражении газового потока от стенок конически сужающегося патруб-ка и закрытого торца ствола [9].

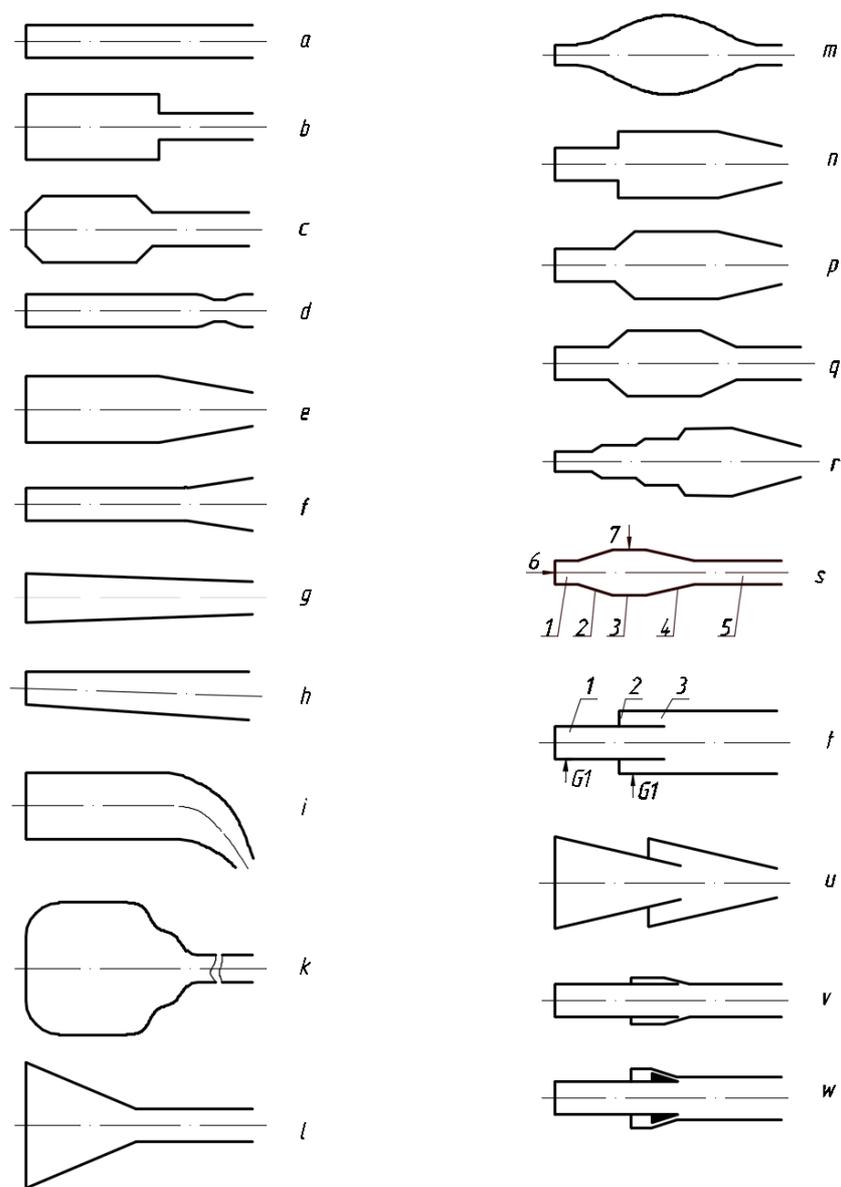


Рисунок 1 — Детонационные камеры сгорания с переменной площадью и размерами поперечного сечения по длине

В доступных работах первым использованием ДКС с переменным по длине сечением явилась ДГУ по а. с. СССР № 513728, ствол которой выполнялся с сужением поперечного сечения в зоне подачи порошка. По мнению авторов патента СССР № 551053, при изменении расхода порошка длина преддетонационного участка также изменяется, что затрудняет поддержание необходимых значений скорости и температуры напыляемых частиц. Поэтому в упомянутой выше работе предложено снабжать ДКС автоматическим устройством изменения проходного сечения в месте сужения (рис. 1, *d*), связанным с регулятором расхода порошка. Сочетание этих устройств позволяет поддерживать неизменной величину преддетонационного участка. Устройство изменения проходного сечения расположено вблизи открытого торца ДКС и выполнено в виде сопла Лавалья. Применение сопел Лавалья на выходе ДКС для напыления покрытий предусмотрено также в патентах [10, 11]. Использование сопел на выходе ДКС особенно перспективно при ДГН с частичным заполнением ГС или ее переменным составом по длине ДКС. Могут применяться как сужающиеся (рис. 1, *e*), так и расширяющиеся сопла (рис. 1, *f*). Сужающиеся сопла позволяют ускорять потоки продуктов детонации с взвешенными в них частицами порошка с дозвуковой скоростью. Расширяющееся сопло позволяет ускорять такие потоки, которые уже достигают сверхзвуковой скорости на входе в него. Сопла Лавалья позволяют разгонять ПД с частицами порошка от дозвуковых до сверхзвуковых скоростей. Они ускоряются до 1 Маха в сужающейся части сопла, а затем ускоряются до скорости более 1 Маха в расширяющейся части.

В [12] проведено исследование ускорения частиц порошкового материала продуктами газовой детонации в стволе детонационной установки с конической дульной частью, выполнены эксперименты по ускорению частиц порошка WC/Co с углами дульной части 0, 1 и 2 градуса. Обна-

ружено, что коническое уширение позволяет существенно увеличить скорость частиц на вылете из ствола за счет относительно небольшого (в пределах 2°) расширения дульной части: можно добиться существенного (более 20 %) увеличения скорости дисперсных частиц в стволе детонационной установки.

В ДКС по а. с. СССР № 513728 увеличивается удельная энергия потока ПД, однако при этом велики потери энергии при его истечении, связанные с наличием резкого перепада сечений. В [10, 11,], а также в а. с. СССР № 655109 для увеличения удельной энергии потока ПД предложено выполнять ДКС с плавно уменьшающимся к открытому торцу проходным сечением. Одним из вариантов является выполнение ДКС в виде полого усеченного конуса (рис. 1, *g*). Такая же форма ДКС используется в а. с. СССР № 1383583. При большом диаметре закрытого торца ДКС снабжается несколькими воспламенителями ГС. Одновременное поджигание ГС несколькими воспламенителями способствует ускорению ПД и сокращению преддетонационного расстояния. Такие ДКС могут также выполняться с выходными соплами или цилиндрическими выходными патрубками, которые могут выполнять роль разгонных участков порошка.

Конические ДКС могут выполняться расширяющимися в направлении открытого торца (рис. 1, *h*).

ДКС по патенту РФ № 2350403 для напыления внутренних поверхностей имеет выходной (разгонный) участок, образованный изгибом по радиусу вплоть до прямого угла с конусным сужением в конце (рис. 1, *i*), причем ДКС и разгонная часть расположены внутри напыляемой детали, а соотношение диаметров конуса разгонной части составляет от $1/3$ до $1/4$. Практическое применение данной конструкции еще более ограничено трудностями поворота потока напыляемых частиц и коротким участком разгона выходной части ствола. Подобные схемы ДГНП перспективны не столько для напыления внутренних поверхностей, сколько для труд-

нодоступных с целью размещения ствола под прямым углом поверхностей. Угол поворота может быть существенно увеличен, вплоть до нормального, при подаче порошка непосредственно в насадок и при достаточной длине разгонного участка.

В работе [5] со ссылкой на патент США № 3846084 1974 г. описана ДКС в виде луковидной ёмкости, из которой ПД истекают через короткий ствол-сопло (рис. 1, *k*). Такая схема ДКС позволяет увеличить время истечения ПД и, тем самым, длительность пребывания в них частиц порошка и степень их нагрева и ускорения. Однако в такой ДКС затруднено инициирование детонационного горения. Кроме того, сложнее обеспечить равномерное заполнение рабочего объема горючей смесью однородного состава.

В патентах [10, 11] (рис. 1, *l*) ёмкость выполнена в виде полого конуса, резко сужающегося в направлении сопряженного с ним цилиндрического разгонного участка. Эта схема ДКС также позволяет увеличить время истечения ПД и, тем самым, длительность пребывания в них частиц порошка и степень их нагрева и ускорения. Однако также затруднительно обеспечить равномерное заполнение рабочего объема горючей смесью однородного состава и инициирование детонационного горения.

Использование ДКС с большими размерами поперечного сечения у закрытого торца, как уже указывалось, затрудняет газообмен и ПГД. Поэтому целесообразно располагать участки с увеличенными размерами поперечного сечения в средней части ДКС. Рациональной представляется схема ДКС, предложенная в патентах [10, 11], с входным участком у закрытого торца с существенно меньшими размерами поперечного сечения (рис. 1, *m*). Средняя часть ДКС может быть выполнена плавно расширяющейся от входного участка до максимального значения с последующим сужением до выходного участка или среза ДКС. Уменьшение сечения входного участка способствует ускорению ПГД.

Примером такой ДКС является предложенная в а. с. СССР № 702584 схема с двумя цилиндрическими ступенями с увеличением диаметра по направлению к открытому торцу и выходным коническим участком (рис. 1, *n*). Для улучшения процессов газообмена и заполнения свежей ГС цилиндрические ступени можно сопрягать плавным переходом, в данном случае коническим (рис. 1, *p*).

В работе [13] экспериментально изучено распространение детонации в каналах переменного сечения как в покоящейся, предварительно перемешанной смеси метана с кислородом, так и при отдельной подаче метана и кислорода в частотном режиме при нормальных условиях. Начальный диаметр составлял 36 мм, выходной — 21 мм, угол схождения конуса равнялся 8°. При отдельной подаче газов детонация оказалась более стабильной и имела более широкие пределы существования. При этом давление в пересжатой детонационной волне оказалось вдвое выше давления волны Чепмена — Жуге. Размер детонационных ячеек составлял для различных смесей от 4 до 8 мм.

По патентам [10, 11] ДКС может быть выполнена состоящей из трех цилиндрических ступеней разного диаметра, одна из которых (с наибольшим диаметром) располагается в средней части и сопрягается с другими ступенями меньшего диаметра коническими переходами (рис. 1, *q*). При этом в качестве разгонного участка используется выходная цилиндрическая ступень.

Подобная схема, предложенная в патенте на полезную модель РФ № 147755, используется в горелках для сжигания газообразного топлива в детонационном режиме.

По патентам [10, 11] ДКС может быть выполнена из нескольких цилиндрических ступеней с увеличением диаметра по направлению от закрытого торца, сопряженных коническими переходами, с последующим переходом к сужающемуся выходному участку (рис. 1, *r*).

По патенту РФ № 2201293 ДКС имеет последовательно расположенные по направлению от закрытого торца к выходному: цилиндрическую ступень 1, выполняющую роль секции воспламенения; расширяющуюся ступень 2; промежуточную цилиндрическую ступень 3; сужающуюся ступень 4 и цилиндрическую разгонную ступень 5 (рис. 1, *s*). ДКС имеет инициирующий элемент 6 и источник искрового зажигания 7. Последний предназначен для воспламенения ГС до тех пор, пока температура инициирующего элемента не станет достаточной для воспламенения ГС. ДКС предназначена для работы с высокой скорострельностью до 100...300 Гц (при непрерывной подаче газов). Для создания повышенного давления в процессе горения рекомендуется выдерживать определенные соотношения геометрических параметров ступеней 1, 2, 3 и 4. Угол наклона относительно оси ДКС образующей конуса 4-й ступени рекомендуется в диапазоне $\beta = 8...35^\circ$, а 2-й секции — $\beta = 15^\circ$ (30...75°).

В а. с. СССР № 769853 для расширения технологических возможностей детонационно-газового напыления предложены ДКС, выполненные с двумя секциями (входной 1 с закрытым торцом и выходной 2 с открытым торцом), заполняемые горючими смесями различного состава. Предложено несколько вариантов ДКС. Наиболее простая и технологичная схема (рис. 1, *t*) состоит из двух цилиндрических ступеней. Выходная ступень большего диаметра охватывает на части длины входную ступень и в зоне их сопряжения образуется кольцевая полость 3, через которую в выходную секцию подаются рабочие газы, в т. ч. ГС G2, в отличие от ГС G1, подаваемой в ступень 1. Обе секции могут быть выполнены с уменьшающимися поперечными сечениями в направлении среза ДКС, например, коническими (рис. 1, *u*). Возможно также выполнение обеих ступеней с одинаковым диаметром (рис. 1, *v*). Полость 3 подачи ГС G2 может сообщаться с полостью выходной ступени 2 сужающейся

конической щелью 4 (рис. 1, *w*). Во всех рассмотренных вариантах могут также использоваться различные выходные сопла.

Детонационные камеры сгорания с переменными формой, площадью и размерами поперечного сечения по длине обеспечивают более широкие технологические возможности для напыления покрытий (возможность заполнения ГС переменного состава, получение единичных пятен с оптимальной геометрией для формирования покрытий, обеспечение оптимальных условий нагрева и ускорения частиц порошка и физико-химических превращений в них и пр.). Так, по а. с. СССР № 803211 ДКС выполнена сужающейся по направлению к открытому концу поперечным сечением. В приведенном примере она выполнена конической на входном участке с переходом на выходной цилиндрический разгонный участок (рис. 2, *a*). Причем данная ДКС предусматривает вертикальную компоновку с открытым концом внизу, а во входном коническом участке устанавливается порошковый питатель, имеющий коническую форму. При этом между стенками ДКС и порошкового питателя образуется кольцевой зазор, сужающийся в направлении разгонного участка (с уменьшением как размеров, так и площади кольцевого зазора). Такая схема позволяет обеспечить подогрев порошка перед его подачей в разгонный участок. Подача горючей смеси и инициирование её горения проводятся со стороны закрытого торца достаточно большого диаметра, а в кольцевом зазоре ускоряется ПГД.

В то же время обеспечивается достаточно большой объем ПД и длительности их истечения. Вместо порошкового питателя во входном коническом участке могут устанавливаться и другие конструктивные элементы, а ДКС может применяться в различном пространственном положении.

По а. с. СССР № 769853 один из вариантов двухступенчатой ДКС, имеющей две цилиндрические ступени — входную 1 и выходную 2, снабжен двухходовым запор-

ным клапаном 3, а входная цилиндрическая ступень на входном торце и в зоне ее сопряжения с выходной разгонной ступенью выполнена с посадочными гнездами для сёдел клапана 4 (рис. 2, *b*). Входная ступень 1 заполняется горючей смесью *G1* через кольцевую полость 5 при правом положении запорного клапана 3, а горючая смесь состава *G2* подается в выходную ступень 2. После заполнения ступеней горючими смесями запорный клапан 3 перемещается влево и открывает кольцевую щель 6, соединяющую ступени. Порошок вводится в выходную ступень 2, заполненную более благоприятной ГС для напыляемого порошка. В сечении А–А поперечное

сечение первой ступени ДКС имеет кольцеобразную форму площадью

$$F_1 = \frac{\pi \cdot (D_1^2 - d_1^2)}{4};$$

в сечении В–В (кольцевая щель) — также кольцеобразную форму, но с меньшей площадью:

$$F_{II} = \frac{\pi \cdot (D_{II}^2 - d_{II}^2)}{4};$$

в сечении С–С — форму круга:

$$F_2 = \frac{\pi D_2^2}{4}.$$

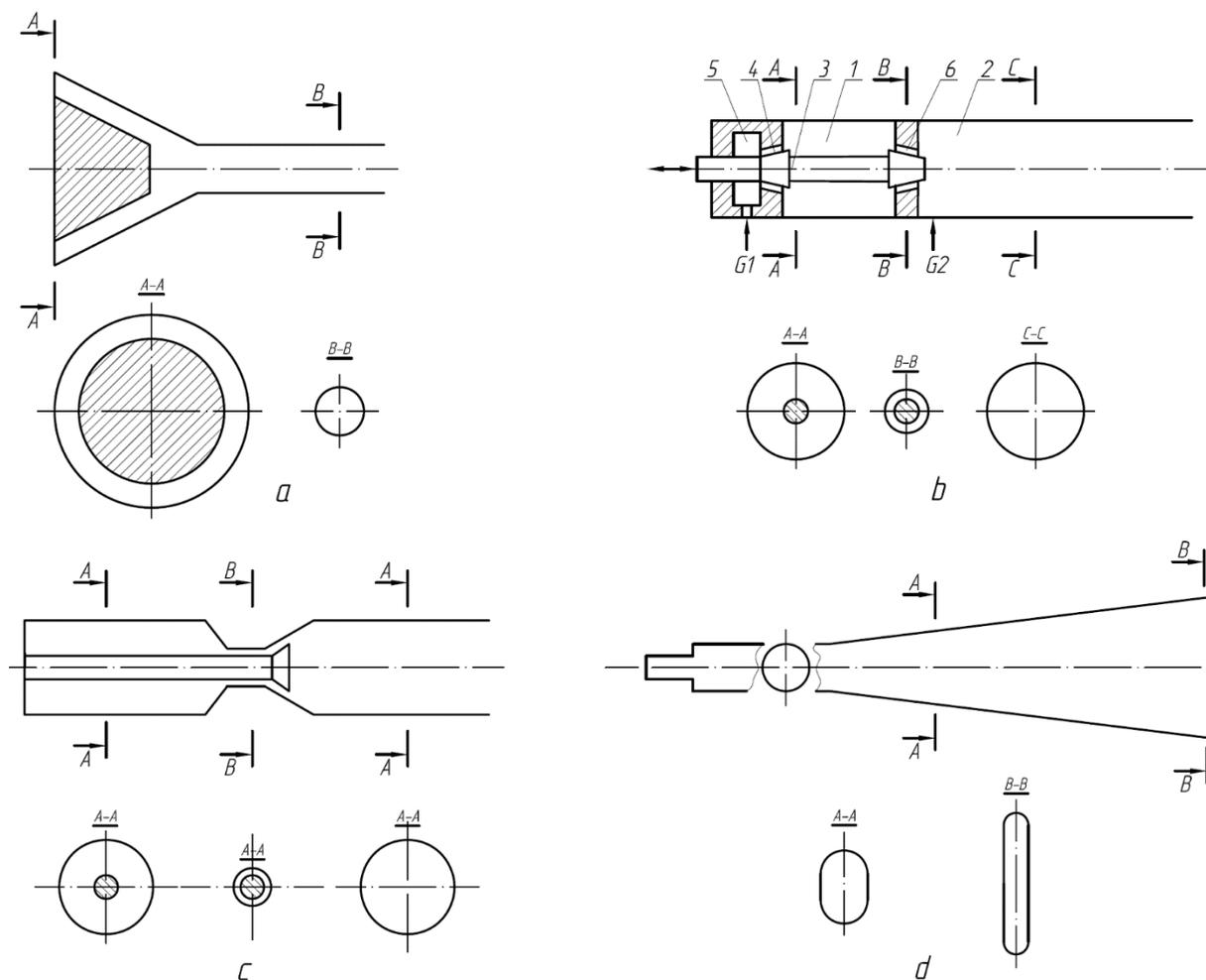


Рисунок 2 — Детонационные камеры сгорания с переменными формой, площадью и размерами поперечного сечения по длине

Причем $d_1 < D_1$; $d_1 < d_{п} < D_{п}$. Здесь D_1 и D_2 — наибольшие диаметры ступеней; $D_{п}$ — наибольший диаметр кольцевой щели, соединяющей ступени; d_1 — диаметр стержня клапана; $d_{п}$ — наименьший диаметр кольцевой щели, соединяющей ступени. Таким образом, поперечное сечение по направлению от закрытого к открытому торцу ДКС имеет кольцеобразную форму с площадью F_1 , изменяется на переходном участке к кольцеобразной форме с постоянно уменьшающейся площадью, а затем — к форме круга выходного участка.

Возможна более простая схема двухступенчатой ДКС с центральным телом (рис. 2, с), в которой происходят следующие изменения поперечного сечения (ПС) по длине: постоянное кольцеобразное сечение первой ступени — плавное уменьшение ПС до постоянного кольцеобразного на участке перехода ко второй ступени — плавное увеличение ПС до постоянного в форме круга выходной ступени.

По [10, 11], а также в а. с. СССР № 790427 ДКС выполняют с плавно изменяющейся формой ПС с переходом от осесимметричной к симметричной относительно одной из осевых плоскостей форме (рис. 2, d). В плоскости симметрии размер ПС выбран увеличивающимся по направлению к открытому торцу, а в перпендикулярной ей плоскости — уменьшающимся. Например, выходную часть ДКС выполняют плавно изменяющейся от цилиндрической к форме ПС, имеющей две плоские параллельные стенки, сопряженные между собой для образования замкнутого контура ПС неосесимметричной формы. Выходная часть ДКС может быть дополнена выходным соплом с постоянным по его длине ПС. Наличие плавного изменения ПС способствует дополнительной турбулизации потока газозвеси порошка, более равномерному нагреву и ускорению.

Детонационные камеры сгорания с переменными положениями осей поперечного сечения по длине (закрученные ДКС) представляют интерес для нанесения покрытий с использованием закрутки импульсных напылительных потоков. Предполагается,

что их применение позволит управлять распределением концентрации напыляемых частиц в потоках, формированием неоднородных распределений плотности, температуры и давления газа по сечению потока, увеличением тепло- и массообмена, перераспределением поля скоростей по сравнению с незакрученными течениями, сепарацией частиц порошка в поле центробежных сил, образованием в приосевой области обратных течений в сильно закрученных потоках, предоставит дополнительные возможности для получения необходимой формы пятна напыления и пр. Уже известны положительные результаты влияния закручивания потока на нанесение покрытий холодным газодинамическим напылением непрерывными высокоскоростными струями [14].

В а. с. СССР № 1572147 предложено ДКС выполнять на всей или части длины с неосесимметричным ПС, сужающимся к выходному торцу с плавным изменением положения осей этого ПС. ДКС может быть выполнена, например, с овальным ПС, причем большая ось овального сечения вблизи закрытого торца расположена вертикально, а по мере приближения к выходному торцу ее положение плавно изменяется поворотом вокруг продольной оси ДКС, вплоть до горизонтального положения (рис. 3). Закручивание рабочей полости ДКС приводит к дополнительной турбулизации газового потока, его ускорению, сокращению ПГД. ДКС может быть выполнена с разнообразным неосесимметричным ПС, например, прямоугольным, квадратным и пр.

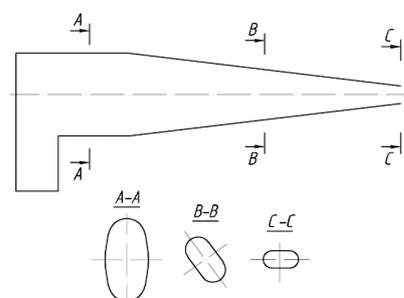


Рисунок 3 — Детонационные камеры сгорания с переменными положениями осей поперечного сечения по длине (закрученные ДКС)

Детонационные камеры сгорания с плавным изменением формы, площади и размеров поперечного сечения по длине позволяют не только расширить технологические возможности ДГНП, присущие рассмотренным выше группам ДКС, но и получать нетрадиционные формы единичных пятен напылённых покрытий.

Например, для нанесения покрытий на кольцевые поверхности небольших размеров возможно использование ДКС с кольцевым поперечным сечением. Однако в случае кольцевой полости сгорания увеличиваются потери энергии потока ПД вследствие увеличения площади ограничивающих стенок почти в 2 раза:

$$S = \frac{\pi L \cdot (D^2 - d^2)}{4}.$$

В машиностроении защитные покрытия часто наносят на кольцевые поверхности таких деталей массового и серийного производства, как тарельчатые клапаны и седла ДВС, запорных и регулирующих клапанов и другой трубопроводной арматуры, торцовые уплотнения и др. Для этих целей перспективно использование ДКС, выполненных с плавно изменяющейся формой поперечного сечения с переходом от осесимметричной к неосесимметричной форме, реализованных в а. с. СССР № 1728582. При таком конструктивном исполнении устройства достигается преобразование импульсного гетерогенного потока, имеющего круглое поперечное сечение, в поток с формой поперечного сечения в виде кольцевого сектора, совпадающего по размерам с обрабатываемой кольцевой поверхностью, например, на которую наносится покрытие.

Ширина кольцевого слоя покрытия, приблизительно равная ширине кольцевого поперечного сечения выходного торца ствола, соответствует ширине упрочняемой кольцевой поверхности. Это исключает энергетические и материальные затраты на нанесение покрытий по причине полного перекрытия единичного пятна напыления

обрабатываемой поверхностью. Одновременно достигается высокая производительность процесса и улучшаются условия формирования покрытий. Последнее прежде всего связано с обеспечением более высокой скорости охлаждения единичного слоя. При использовании конических (или цилиндрических) стволов при равной производительности резко возрастает толщина единичного слоя покрытия, что снижает скорость охлаждения и интенсифицирует процессы разложения (диссоциации) материала покрытия. Кроме того, при переходе к кольцевой форме поперечного сечения уменьшается поперечное сечение ствола, что формирует пересжатые детонационные волны и способствует более эффективному энергообмену между потоком продуктов сгорания и частицами порошка.

ДКС может быть выполнена цилиндрической с преобразованием круглой формы поперечного сечения на всей или части длины в форму кольцевого сектора (рис. 4, а). При таком конструктивном исполнении достигается не только преобразование формы поперечного сечения гетерогенного потока, но и уменьшение площади его поперечного сечения и, тем самым, повышение его параметров за счет реализации режима пересжатой детонации. Наружный диаметр ствола (цилиндрический участок) соответствует наружному диаметру кольцевого участка поверхности, на который наносится покрытие. Данный вариант устройства наиболее целесообразен для применения при обработке кольцевых поверхностей относительно небольшого диаметра. Напыляемый порошок фокусируется в кольцевой сектор, что исключает его излишние затраты, а также бесполезное расходование энергии за счет приведения к геометрическому соответствию формы и размеров поперечного сечения гетерогенного потока и обрабатываемой поверхности.

ДКС может быть выполнена также на всей или части длины в форме конфузора, расширяющегося в направлении открытого торца, с преобразованием круглой формы поперечно-

го сечения на всей или части длины в форму кольцевого сектора (рис. 4, *b*). При таком конструктивном исполнении устройства обеспечивается возможность обработки кольцевых поверхностей, диаметр которых превышает размеры начального участка ствола, примыкающего к закрытому торцу. Этот вариант применяется для напыления кольцевых поверхностей с наружным диаметром свыше 40 мм.

ДКС может быть на всей или части длины выполнена конической, сужающейся в направлении открытого торца, с преобразованием круглой формы поперечного сечения на всей или части длины в форму

кольцевого сектора (рис. 4, *c*). При таком конструктивном исполнении обеспечивается возможность обработки кольцевых поверхностей небольшого диаметра, а также более высокая степень пересечения детонационной волны, ведущая к улучшению качества наносимого слоя.

При использовании ДКС этого типа уменьшение площади внутренних стенок ДКС снижает теплоотвод потока ПД. Упрощается конструкция ДКС и её обслуживание при эксплуатации ДГУ. Расход рабочих газов по предварительным оценкам снижается на 3...8 %, а порошка — на 15...40 %.

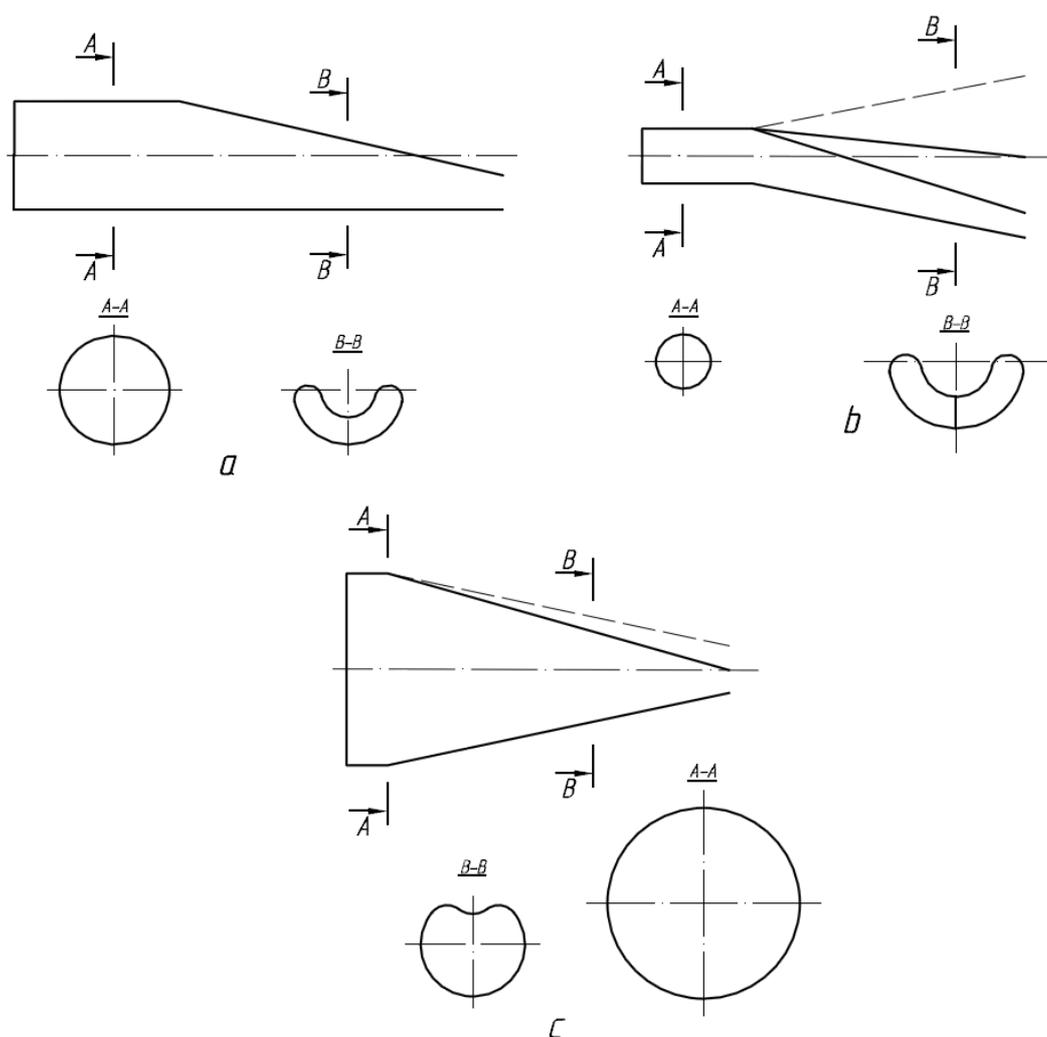


Рисунок 4 — Детонационные камеры сгорания с плавным изменением формы, площади и размеров поперечного сечения по длине

Выводы:

1. Технологические возможности детонационно-газового напыления покрытий с требуемыми свойствами могут быть существенно расширены при использовании профилированных камер детонационного сгорания, причем не только конических, но и с изменением вдоль продольной оси формы, размеров и положения осей поперечного сечения.

2. Возможности изменения поперечного сечения детонационных камер сгорания могут быть использованы для поиска условий получения единичных пятен напыления оптимальной конфигурации с

учетом формы и размеров напыляемых поверхностей.

3. Изменение формы поперечного сечения и закручивание камер сгорания вдоль их продольной оси могут быть использованы для управления параметрами потока продуктов детонации и взаимодействия их с частицами напыляемого порошка.

4. Детонационные камеры сгорания с переменным сечением могут найти реализацию и в других практических применениях газовой детонации: струйно-абразивной обработке, обработке дисперсных материалов, очистке твердых поверхностей и др.

Библиографический список

1. *Детонационно-газовые технологии и устройства: состояние и перспективы развития. Сообщение 3. Применение газовой детонации в обрабатывающих и обслуживающих отраслях экономики / Ю. А. Харламов [и др.] // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2021. № 27 (70). С. 73–84.*
2. Kharlamov Y. A. *Gaseous pulse detonation spraying: current status, challenges, and future perspective // Intern. Thermal Spray Conference & Exposition ITSC 2008. Maastricht : Conference Proceedings, 2008. P. 159–166.*
3. *Применение детонации в газах для нанесения покрытий / Ю. А. Харламов [и др.] // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11. № 1. С. 88–95.*
4. Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А. *Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. М. : Наука, 1978. 224 с.*
5. Зверев А. И., Шаривкер С. Ю., Астахов Е. А. *Детонационное напыление покрытий. Л. : Судостроение, 1979. 232 с.*
6. Харламов Ю. А. *Стволы установок для детонационного напыления покрытий // Автоматическая сварка. 2001. № 10. С. 17–21.*
7. Харламов Ю. А., Сундарараджан Г., Цяпа А. Н. *Конструктивные особенности детонационных камер сгорания для напыления // Вісник Східноукраїнського національного університету. 2001. № 5 (39). С. 169–178.*
8. Гавриленко Т. П., Прохоров Е. С. *Пересжатая детонационная волна в газе // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17. № 6. С. 121–125.*
9. Батраев И. С., Прохоров Е. С., Ульяницкий В. Ю. *Разгон и нагрев порошковых частиц продуктами газовой детонации в каналах с коническим переходом // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50. № 3. С. 78–86.*
10. *Dispositif de canon pour la projection de revetements par detente de gaz : nat. 81 02856 Франция. № 2499874; опубл. 20.08.1982. 22 с.*
11. *Detonation schichtungs vorrichtung : nat. DE 31 05323 C2 ФРГ. Опубл. 02.09.1982. 9 с.*
12. Батраев И. С., Прохоров Е. С., Ульяницкий В. Ю. *Ускорение дисперсных частиц продуктами газовой детонации в расширяющемся канале // Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике : тезисы докладов IX международной конференции. Новосибирск, 2020. С. 197–198.*
13. Бивол Г. Ю., Головастов С. В., Голуб В. В. *Формирование пересжатой волны детонации в потоке метано-кислородных смесей в канале переменного сечения // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. Вып. 4. С. 576–581. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0040364417030036>*
14. *Управление формой пятна напыления при ХГН. Часть 2. Процесс напыления / В. Н. Зайковский [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21. № 2. С. 233–240.*

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Вишневским Д. А.,
д.т.н., проф., зав. каф. АТ ЛГУ им. В. Даля Замотой Т. Н.

Статья поступила в редакцию 20.04.2023.

Doctor of Technical Sciences Kharlamov Yu. A., PhD in Engineering Petrov P. A., PhD in Engineering Iziumov Yu. V., Orlov A. A. (Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation)

DETONATION-GAS COMBUSTION CHAMBERS OF VARIABLE CROSS-SECTION FOR COATING SPRAYING

The article is devoted to systematization and comparative analysis of design features and schemes of detonation combustion chambers with variable cross-section used in installations for detonation-gas spraying of coatings and other types of processing, mainly dispersed materials, their systematization and search for ways to improve them. Pulsed (detonation) combustion chambers (DCS) are the most important unit of detonation-gas installations and are designed for cyclic combustion of combustible gas mixtures and the creation of pulsed high-speed flows of detonation products and their interaction with powder particles of the sprayed material with the formation of sputtering heterogeneous jets. DCS with a variable cross-section have a set of technological advantages and, above all, the implementation of combustion in the mode of burning detonation, an increase in the speed and temperature of the sprayed particles and an improvement in the properties of the coatings obtained. Four main groups of DCS with variable cross-section are considered: with variable area and dimensions of the cross-section along the length; with variable shape, area and dimensions of the cross-section along the length; with variable positions of the cross-section axes along the length (twisted DCS); with a smooth change in the shape, area and dimensions of the cross-section along the length. Examples of such DCS, advantages and disadvantages are given.

Key words: detonation combustion chambers, detonation products, detonation waves, profiled chambers, gas mixtures, sprayed particles.

References

1. Kharlamov Yu. A. Detonation-gas technologies and devices: state and prospects of development. Report 3. Use of gas detonation in manufacturing and service industries [Detonacionno-gazovye tekhnologii i ustrojstva: sostoianie i perspektivy razvitiya. Soobshchenie 3. Primenenie gazovoi detonacii v obrabatyvayushchikh i obsluzhivayushchikh otrasliakh ekonomiki]. Scientific works collection of DonSTI. 2021. No. 27 (70). Pp. 73–84. (rus)
2. Kharlamov Yu. A. Gaseous pulse detonation spraying: current status, challenges, and future perspective. Intern. Thermal Spray Conference & Exposition ITSC 2008. Maastricht, The Netherlands: Conference Proceedings, 2008. Pp. 159–166.
3. Kharlamov Yu. A. Use of detonation in gases for coating [Primenenie detonacii v gazakh dlya naneseniya pokrytij]. Combustion, Explosion, and Shock Waves. 1975. Vol. 11. No 1. Pp. 88–95. (rus)
4. Shorshorov M. Kh. Physical and chemical bases of detonation gas spraying coatings [Fiziko-khimicheskie osnovy detonacionno-gazovogo napyleniya pokrytij]. M.: Science, 1978. 224 p. (rus)
5. Zverev A. I. Detonation spraying of coatings [Detonacionnoe napylenie pokrytij]. L.: Shipbuilding, 1979. 232 p. (rus)
6. Kharlamov Yu. A. Trunks of installations for detonation spraying of coatings [Stvoly ustanovok dlya detonacionnogo napyleniya pokrytij]. Automatic Welding. 2001. No. 10. Pp. 17–21. (rus)
7. Kharlamov Yu. A. Design features of detonation combustion chambers for spraying [Konstruktivnye osobennosti detonacionnykh kamer sgoraniya dlya napyleniya]. Bulletin of East-Ukrainian National University. 2001. No. 5 (39). Pp. 169–178. (rus)
8. Gavrilenko T. P. Over-compressed detonation wave of gas [Pereshhataia detonacionnaia volna v gaze]. Combustion, Explosion, and Shock Waves. 1981. Vol. 17. No. 6. Pp. 121–125. (rus)
9. Batraev I. S. Acceleration and heating of powder particles by gas detonation products in channels with conical transition [Razgon i nagrev poroshkovykh chastits produktami gazovoi detonacii v

kanalakh s konicheskim perekhodom]. Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2014. Vol. 50. No. 3. Pp. 78–86. (rus)

10. Kharlamov Yu. A., Kalenov V. I., Pisklov Yu. L., Ryaboshapko B. L. *Dispositif de canon pour la projection de revetements par detente de gaz. Patent France 81 02856, no. 2499874, 1982.*

11. Kharlamov Yu. A., Kalenov V. I., Pisklov Yu. L., Ryaboshapko B. L. *Detonation schichtungs vorrichtung. Patent German DE 31 05323 C2. 1982.*

12. Batraev I. S. *Particulate acceleration by gas detonation products in expanding channel [Uskoreniye dispersnykh chastits produktami gazovoi detonacii v rasshiryayushchemsya kanale]. Lavrentyev readings on mathematics, mechanics and physics: Theses of IX International Papers. 2020. Pp. 197–198. (rus)*

13. Bivol G. Yu. *Formation of the over-compressed detonation wave in the flow of methane-oxygen mixtures in the variable cross-section channel [Formirovaniye pereshhatoi volny detonacii v potoke metano-kislorodnykh smesey v kanale peremennogo secheniya]. High Temperature. 2017. Vol. 55. Iss. 4. Pp. 576–581. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0040364417030036> (rus)*

14. Zaikovskiy V. N. *Control of Spray Spot Shape at CGS. Part 2. Spraying Process [Upravlenie formoj pyatna napyleniya pri KhGN. Chast' 2. Protsess napyleniya]. Thermophysics and Aeromechanics. 2014. Vol. 21. No. 2. Pp. 233–240. (rus)*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Юрий Александрович, д-р техн. наук, профессор каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

Петров Павел Александрович, канд. техн. наук, доцент каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

Изюмов Юрий Викторович, канд. техн. наук, доцент каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

Орлов Андрей Андреевич, ассистент каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ