

УДК 621.793.7

¹Харламов Ю. А., ¹Вишневский Д. А., ¹Петров П. А., ²Бочаров А. В.¹Донбасский государственный технический университет,²Липецкий государственный технический университет

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПУЛЬСИРУЮЩИХ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫХ УСТРОЙСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Статья посвящена анализу рабочего цикла пульсирующего процесса детонационно-газового напыления и возможных направлений его совершенствования, который позволяет рассчитывать на улучшение технико-экономических показателей и упрощение конструкций оборудования. Длительность продувки детонационно-газовых камер сгорания может быть сокращена за счет более рациональной организации подачи продувочного газа при минимальном перемешивании с остаточными продуктами сгорания, а также выбором оптимальной длины продувочной пробки. Представлен полный цикл работы детонационно-газовых установок для напыления, выраженный в последовательности смены восьми фаз в единичном цикле работы.

Ключевые слова: детонационно-газовые установки, напыление поверхностей, продувочная пробка, пульсирующий процесс газового напыления, искровой источник, окислитель.

Введение. В простейшем случае устройство для детонационно-газового напыления представляет собой трубу, оснащенную системами подачи горючего газа и окислителя (кислорода, воздуха, в том числе обогащенного кислородом и др.), а также системами подачи порошка и инициирования детонации [1–3]. С одного конца труба открыта, с другого — полностью закрыта, частично закрыта или периодически перекрывается с помощью различных клапанов для пульсирующей подачи газов и является основным органом детонационно-газовой установки (ДГУ) — детонационной камерой сгорания (ДКС). Единичный рабочий цикл начинается с частичного или полного заполнения горючей смесью газов (ГС) и порошком напыляемого материала. Затем производится инициирование детонации смеси, в результате чего вдоль ДКС распространяется детонационная волна (ДВ), которая, сжигая ГС, создает высокое избыточное давление и большую скорость продуктов детонации (ПД). Частицы порошка нагреваются и с высокой скоростью выбрасываются на поверхность напыляемого изделия, образуя единичный слой покрытия. После выхода ДВ в атмосферу давление в

ДКС снижается, затем может проводиться продувка ДКС от ПД, либо сразу подается новая порция ГС, и происходит повторение единичного цикла процесса напыления. Обычно частота повторения циклов составляет 4...10 Гц. Такая организация рабочего процесса в пульсирующих детонационно-газовых устройствах для напыления покрытий (ДГУ) усложняет их конструкцию и техническое обслуживание и ограничивает возможности повышения производительности напыления и других технологических операций. Для обеспечения требуемой последовательности и расхода рабочих газов в ДГУ необходимо использовать подвижные детали, что ведет к их износу.

Цель данной статьи заключается в анализе рабочего цикла пульсирующего процесса детонационно-газового напыления и возможных направлениях его совершенствования.

Особенности единичного рабочего цикла процесса детонационно-газового напыления. Рабочий процесс напыления реализуется в детонационной камере сгорания, где организуется регулярное пульсирующее сжигание горючей смеси газов в детонационном режиме. Основными фазами единичного цикла являются следующие:

1. Заполнение рабочей полости ДКС подготовленной горючей смесью газов.

2. Подача в ДКС порции напыляемого порошка, может выполняться во время заполнения ДКС горючей смесью газов.

3. Инициирование горения и обеспечение его перехода в детонацию.

4. Выхлоп из ДКС продуктов горения и детонации со взвешенными частицами порошка.

5. Продувка ДКС от остаточных газов.

На рисунке 1 представлена типичная последовательность смены фаз в единичном цикле работы детонационно-газовой установки для напыления (ДГУ).

В нулевой фазе рабочего цикла работы ДГУ рабочая полость ее ДКС заполнена остаточными газами при атмосферном давлении p_0 , состав которых зависит от используемых принципов организации рабочего процесса: с продувкой продувочным газом или без продувки с вытеснением остаточных газов свежей горючей смесью. Обычно традиционные ДГУ работают с удалением остаточных газов продувкой, после которой рабочая полость ДКС заполнена продувочным газом, однако по направлению к открытому концу могут быть подмешаны продукты сгорания и атмосферный воздух. В первоначальный период времени работы ДГУ по напылению конкретных изделий температура остаточных газов будет равна температуре окружающей среды, а затем будет постепенно повышаться до критического значения, зависящего от конструктивных особенностей ДГУ и системы охлаждения.

Первая фаза рабочего цикла заключается в подготовке и заполнении ДКС горючей смесью газов, включающей по крайней мере два компонента — горючий газ и окислитель. В качестве горючих газов используются ацетилен, пропан-бутан, МАФ, метан и др., а также их смеси. В качестве окислителя обычно используется кислород, в отдельных случаях может использоваться воздух, в том числе обогащенный кислородом. Для регулирования параметров про-

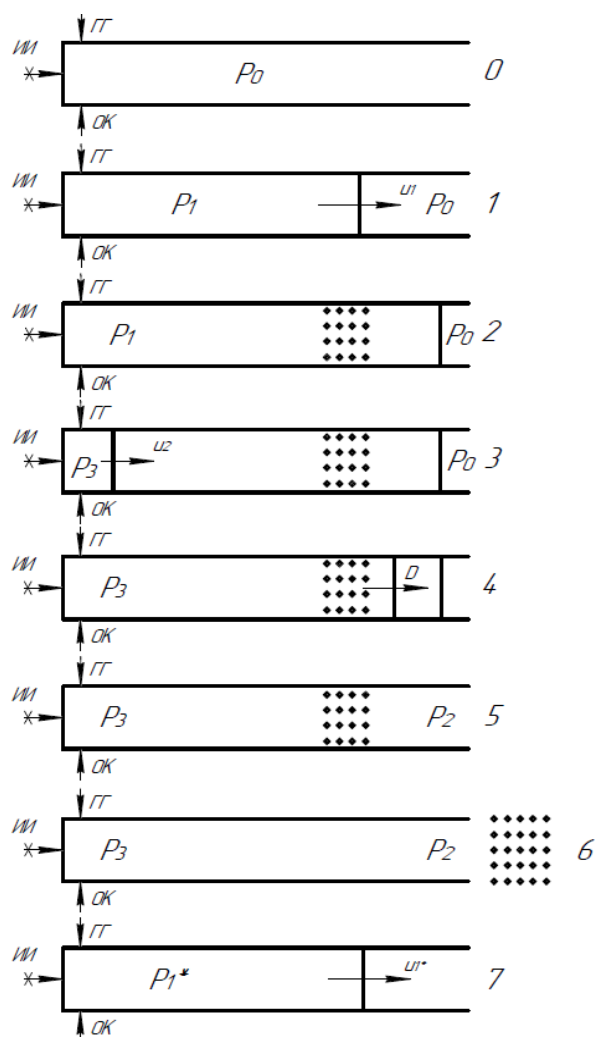
дуктов детонации в горючую смесь могут вводиться инертные газы и азот. Обычно горючая смесь вводится в ДКС у ее закрытого конца, причем могут вводиться отдельными струями горючий газ и окислитель с их последующим перемешиванием в ДКС или уже подготовленная в смесительной камере горючая смесь. В первом случае смешение горючего газа и окислителя требует определенного пути перемешивания, для его достаточности принимаются специальные меры. В процессе наполнения рабочую полость ДКС схематично можно представить условно разделенной на две зоны границей раздела между свежей горючей смесью и остаточными газами, движущейся в направлении открытого конца со скоростью U_1 (рис. 1). Время и расход газовых компонентов горючей смеси определяют степень наполнения ДКС:

$$k = \frac{L_{fg}}{L},$$

где L_{fg} — длина участка ДКС, заполненной свежей горючей смесью (от закрытого конца до границы раздела свежей горючей смеси и остаточных газов); L — длина ДКС.

Для осуществления эффективного рабочего процесса детонационно-газового напыления необходимо выполнение ряда условий, нарушение которых не позволит обеспечить устойчивую регулярную детонацию горючей смеси. Это прежде всего строгое поддержание состава горючей смеси, подаваемой в рабочую полость ДКС, и степени наполнения ДКС. Необходимо исключить преждевременное воспламенение горючей смеси от горячих стенок ДКС и газоподводящих элементов, а также неуправляемого самовоспламенения в контакте и при смешении горючей смеси с остаточными газами.

Время наполнения ДКС свежей горючей смесью $t_{ДКС}$ является наиболее длительной фазой единичного цикла напыления, а сам процесс газообмена — неизученным.



ГГ — горючий газ; ОК — окислитель
 ии — искровой источник; 0 — атмосферные условия в ДКС; 1 — заполнение ДКС горючей смесью; 2 — подача в ДКС порции порошка напыляемого материала; 3 — инициирование горения и переход горения в детонацию (ПГД); 4 — сгорание горючей смеси в детонационном режиме; 5 — полное сгорание горючей смеси, нагрев и ускорение частиц порошка продуктами детонации; 6 — истечение (выхлоп) продуктов сгорания с частицами порошка из ДКС; 7 — продувка ДКС (удаление остаточных продуктов сгорания и других газов)

Рисунок 1 — Цикл работы ДГУ

Вторая фаза единичного цикла работы ДГУ связана с подачей в ДКС порции порошка напыляемого материала. Основным условием для эффективной реализации процесса напыления является обеспечение оптимального размещения достаточно от-

меренной дозы порошка в ДКС перед инициированием горения и детонации. Эта фаза обычно во времени совмещается с наполнением ДКС горючей смесью. Доза порошка вдувается в ДКС струей транспортирующего газа, обычно азота или воздуха. Применяют осевую подачу порошка со стороны закрытого конца и поперечную подачу. Первый вариант осуществляется с помощью специального водоохлаждаемого сопла, введенного в рабочую полость ствола, и преимущественно использовался в первых создаваемых ДГУ. Транспортирующий газ разбавляет горючую смесь и влияет на характер и интенсивность взаимодействия частиц порошка и продуктов детонации. При использовании этого способа порошковое облачко перемещается в направлении открытого конца, при этом трудно обеспечить его оптимальную длину и равномерное распределение по его объему частиц порошка, имеет место осаждение частиц на стенки ДКС. В последнее время ведутся работы по созданию и совершенствованию способов и устройств для поперечной подачи порошка. Однако детальные сведения об исследовании процессов ввода порошка отсутствуют.

Третья фаза связана с инициированием горения горючей смеси в детонационном режиме. Известны два принципиальных подхода к реализации детонационных режимов горения: прямое инициирование детонации и переход от медленного горения к детонации (ПГД). В условиях напыления покрытий используют второй подход ПГД. После достижения требуемой степени наполнения ДКС горючей смесью иницируется горение искровым разрядом (обычно с помощью автомобильной свечи). Использование подобных малоинтенсивных источников инициирования детонации, когда энергия, выделяемая источником, во много раз меньше энергии, выделяемой при детонации топливной смеси, характерно для большинства энергосиловых и технологических установок. Инициирование горения в ДГУ чаще осуществ-

ляется в камерах зажигания, обеспечивающих факельный механизм зажигания в рабочей полости ДКС и, соответственно, более быстрый переход горения к детонации. Механизмы инициирования горения и детонации являются предметом многочисленных исследований в теории горения и детонации. После поджига смеси переход горения в детонацию происходит на значительном расстоянии от закрытого торца трубы, а скорость детонационной волны не сразу достигает значения, соответствующего скорости установившейся детонации Чепмена — Жуге [4, 5].

Преддетонационный период времени от момента зажигания до возникновения детонационной волны $t_{\text{пред}}$ и длина преддетонационного участка $L_{\text{пред}}$ зависят от состава и свойств горючей смеси, конструктивных особенностей и условий в ДКС. Например, для ацетиленокислородной смеси $L_{\text{пред}}$ не превышает размера поперечного сечения ДКС, а для пропановоздушной смеси чрезмерно велика. Известно много и разрабатываются новые средства и пути уменьшения преддетонационного участка для ПГД [6].

Четвертая фаза включает в себя сгорание горючей смеси в детонационном режиме. Скорость детонационного горения на два порядка превышает скорость нормального горения. Частота циклов детонационного сгорания варьируется путем независимого инициирования детонации, контролируемой системой зажигания, согласованной с работой систем подачи в ДКС газов и порошка. Скорость фронта детонационной волны D в газах составляет 1,5...3 км/с, скорость продуктов химической реакции u в 2...4 раза меньше, а давление определяется из равенства

$$PD = p \cdot u \cdot D.$$

Значение температуры находится в пределах 2000–5000 К. Для перехода от дефлаграции к детонации, а также передаче детонации для данной горючей смеси

необходимо выдерживать определенные геометрические соотношения по длине, диаметру трубы, зависящие от размера ячейки детонационного фронта смеси [7]. При прохождении ДВ через порошковое облачко начинается взаимодействие частиц порошка с продуктами детонации и изменение параметров детонации.

Пятая фаза относится к полному сгоранию горючей смеси с выходом детонационной волны на срез ДКС или границу раздела с остаточным газом, нагреву и ускорению частиц порошка продуктами детонации в рабочей полости ДКС. После прохождения ДВ через порошковое облачко начинается взаимодействие между потоком продуктов детонации (газовой фазой) и частицами порошка (твердой фазой), которые нагреваются и ускоряются в направлении открытого конца ствола. По мере перемещения порошкового облака происходит интенсивный энергообмен между фазами в сближение значений температуры и скорости фаз. Интенсивность этого сближения зависит от теплофизических свойств и параметров ПД и материала частиц порошка, а также в значительной мере от формы и размеров части порошка. Имеет место химическое взаимодействие между твердой и газовой фазами.

Шестая фаза начинается после достижения ДВ открытого конца ДКС, когда в продуктах детонации по направлению закрытого конца распространяется волна разрежения и начинается истечение (выхлоп) продуктов детонации с частицами порошка. Из ДКС истекает импульсная напылительная струя [8] и на определенном расстоянии от среза (дистанции напыления) соударяется с напыляемой поверхностью, образуя единичное пятно покрытия. Вопросы формирования детонационно-газовых напылительных струй и образования покрытий являются предметом большинства исследований.

Седьмая (заключительная) фаза рабочего цикла ДГУ относится к продувке ДКС для удаления остаточных продуктов сгора-

ния горючей смеси. Продувка выполняется для подготовки ДКС к последующему рабочему циклу, обеспечивая минимальное подмешивание продуктов детонации в свежую порцию горючей смеси и исключая ее прямой контакт с горячими продуктами детонации во избежание преждевременного воспламенения. Чем выше скорострельность (частота повторения единичных циклов напыления), тем более горячие продукты детонации вытесняются из ДКС. Обычно для продувки используют относительно дешевый азот, иногда даже воздух. При прочих равных условиях режим движения газа определяет скорость его потока: ламинарный — при низких скоростях, турбулентный — при высоких. Поэтому скорость вытеснения остаточных продуктов сгорания должна быть выше некоторой граничной величины, соответствующей переходу от турбулентного к ламинарному режиму, поскольку при турбулентном течении контактирующие газы смешиваются в меньших объемах [9].

Продувка ствола инертными газами позволяет обеспечить полное вытеснение остаточных газов, содержащих продукты сгорания и частицы порошка, дополнительное охлаждение стенок ствола, а при достаточном расходе и длительности подачи — и охлаждение напыляемого изделия, исключает перемешивание свежей горючей смеси с продуктами сгорания. Подбором состава продувочного газа можно в какой-то мере управлять характером перемешивания свежей горючей смеси с вытесняемым газом. Надлежащим построением циклограммы рабочего цикла процесса достигается защита с помощью продувочного газа от обратного удара пламени. Недостатками этого приема являются увеличенный расход газов и усложнение конструкции ДГУ.

Длительность единичного цикла детонационно-газового напыления t определяется временем $t_{згс}$ заполнения ДКС горючей смесью, временем на подачу порошка, преддетонационным периодом,

временем t_p детонационного сгорания, временем истечения импульсного напылительного потока и временем продувки:

$$t = t_{згс} + t_{пор} + t_{пред} + t_d + t_{и} + t_{пр}.$$

Скорострельность ДГУ (частота пульсаций)

$$v = \frac{1}{t}.$$

Скорострельность можно увеличить за счет уменьшения длительности отдельных фаз рабочего цикла и, прежде всего, заполнения ДКС свежей горючей смесью и продувки. Подачу порошка следует совмещать с наполнением ДКС горючей смесью. Относительные доли времени рабочего цикла на преддетонационный период, детонационное сгорание и истечение продуктов сгорания незначительны и для определенных ДКС и условий напыления не контролируются.

Минимально возможное время заполнения ДКС постоянного сечения свежей горючей смесью можно оценить введением коэффициента k в выражение работы [10]:

$$t_{згс} = \frac{kL}{a_{кр1}}.$$

где k — степень заполнения ДКС по длине (относительная доля длины ДКС, заполняемая свежей горючей смесью), при полном заполнении $k=1$; L — длина ДКС; $a_{кр1}$ — критическая скорость звука горючей смеси.

Время подачи порошка учитывается при осуществлении её после наполнения ДКС горючей смесью и определяется экспериментально или задается циклограммой ДГУ.

Преддетонационный период определяется экспериментально для используемой горючей смеси, конструктивных особенностей ДГУ и условий в ДКС.

Время инициирования детонации, полагаемая равномерное ускорение фронта пламени от момента искрового разряда до возникновения детонации:

$$t_{пред} = \frac{2L_{пред}}{D},$$

где $L_{\text{пред}}$ — длина преддетонационного участка.

Время детонационного сгорания:

$$t_{\text{д}} = \frac{(kL - L_{\text{пред}})}{D} = \frac{kL}{D} - \frac{L_{\text{пред}}}{D}.$$

Время истечения продуктов сгорания:

$$t_{\text{и}} \approx \frac{L}{a_{\text{кр2}}},$$

где $a_{\text{кр2}}$ — скорость звука продуктов сгорания.

Минимально возможное время продувки ДКС постоянного сечения по всей длине:

$$t_{\text{пр}} \approx \frac{L}{a_{\text{кр3}}},$$

где $a_{\text{кр3}}$ — скорость звука продувочного газа.

Тогда сумма относительных долей времени единичного цикла, необходимых для выполнения отдельных его элементов (фаз), может быть представлена как

$$1 = \frac{t_{\text{згс}}}{t} + \frac{t_{\text{пор}}}{t} + \frac{t_{\text{пред}}}{t} + \frac{t_{\text{д}}}{t} + \frac{t_{\text{и}}}{t} + \frac{t_{\text{пр}}}{t}.$$

Длительность единичного цикла можно представить также как

$$t = \frac{L \left(\frac{k}{a_{\text{кр1}}} + \frac{k}{D} + \frac{1}{a_{\text{кр2}}} + \frac{1}{a_{\text{кр3}}} \right) + t_{\text{пор}} + L_{\text{пред}}}{D}.$$

Способы организации рабочего процесса в детонационно-газовых устройствах технологического назначения. Кроме напыления покрытий газовая детонация применяется и при других видах обработки, связанных с вводом в ДКС различных материалов: струйно-абразивной обработке, сфероидизации порошков, получении специальных материалов и др. Многие из подобных установок работают с выполнением отдельных фаз рабочего процесса в последовательности, показанной на рисунке 1. Состояние газовой среды в ДКС

по её длине для этого способа организации рабочего процесса показана на рисунке 2, а. ДГУ, работающие с такой формой организации, используют механические или электромеханические клапаны для циклической подачи газов в ДКС. Однако всё возрастающие требования к повышению надежности и упрощению конструкций ДГУ привели к разработке других методов организации рабочего процесса.

Продувка охлажденными продуктами сгорания. Подача свежей горючей смеси с непосредственным выталкиванием ею продуктов сгорания реализуется или при непрерывном вводе её в камеру сгорания, или при пульсирующей её подаче. В первом случае условия ввода горючей смеси должны быть согласованы с условиями проскока пламени. Теория проскока пламени дана в работах [11, 12]. Для бедных ацетиленокислородных смесей при использовании горючих газов-заменителей ацетилена и топливно-воздушных смесей могут применяться, как правило, обычные инжекционные смесители, используемые при газопламенной обработке. Вопросы непрерывного ввода горючей смеси в ствол рассмотрены также в работах [3, 13, 14]. На основе анализа процессов, сопутствующих детонации газов в трубах, предложено вводить газовую смесь в ствол ДГУ через сопло с использованием принципа инжекторного смешения горючего газа и кислорода (по а. с. СССР № 508994 и патенту на полезную модель РФ № 147755). При размерах сопла, обеспечивающих истечение смеси в режиме отрыва пламени, и расположении его перпендикулярно к оси ствола проникновение детонации в зону инжекции (обратный удар) отсутствует. Благодаря использованию в качестве несущего газа кислорода с подсосом ацетилена низкого давления обеспечивается локализация горения в зоне инжектора в случае аварийного прорыва пламени через сопло и устранение аварийной ситуации путем срыва инжекции за счет подачи азота в зону инжекции (объем вводимого газа не превышает 5 % объема ствола).

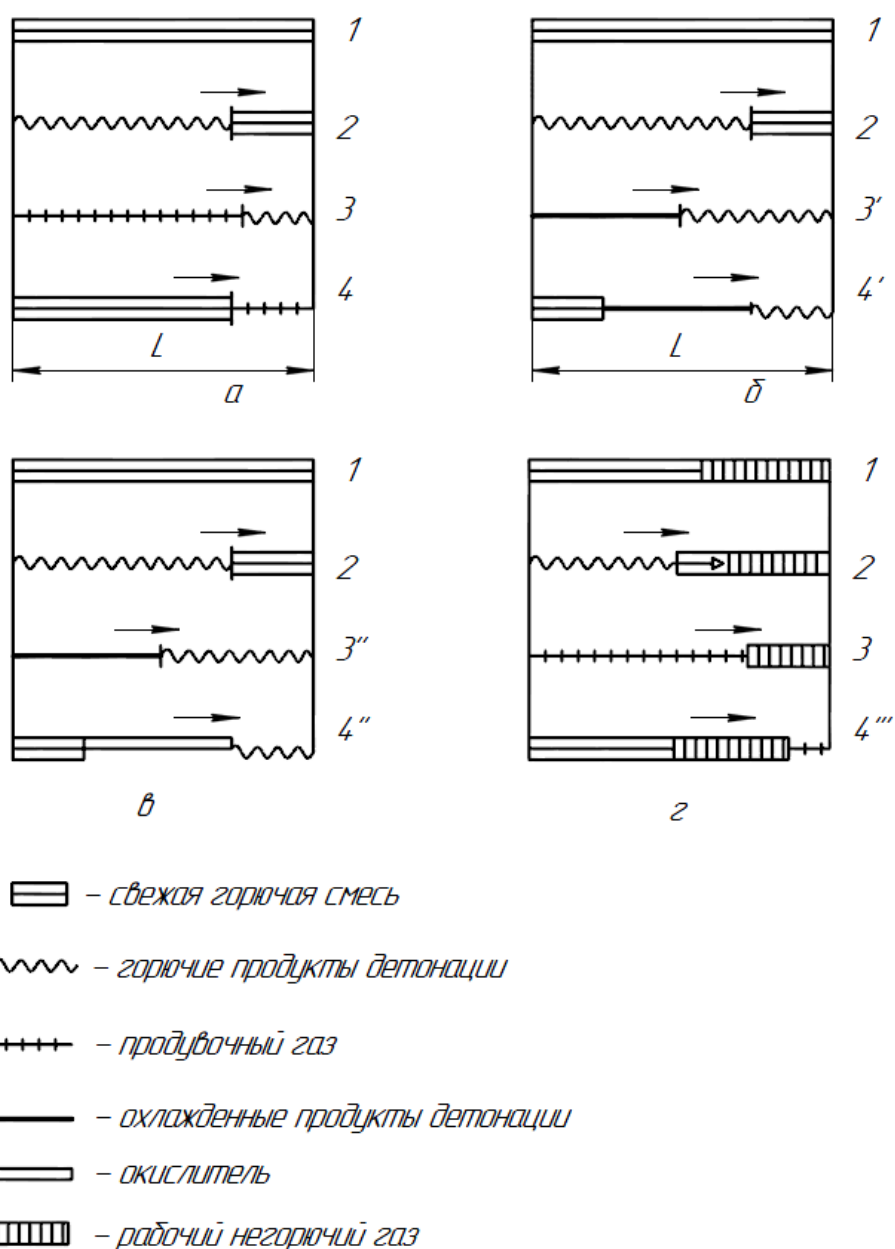


Рисунок 2 — Состояния газовой среды в детонационно-газовых камерах сгорания для напыления покрытий при различных способах организации рабочего процесса в ДГУ:

- а — с полной продувкой ДКС; б — продувка охлажденными продуктами сгорания;
 в — продувка газом — компонентом горючей смеси;
 г — неполное заполнение ДКС горючей смесью

Во втором случае используют клапанные или иные системы, обеспечивающие прерывание подачи свежей смеси во время её сгорания и охлаждения продуктов сгорания.

В последние годы разрабатываются бесклапанные ДГУ, позволяющие повысить скорострельность. Одна из таких установок, использующих газодинамические клапаны, предложена в а. с. РФ № 147755. Подача газов осуществляется бесклапанным методом, запираание магистралей подачи происходит за счет эффекта газодинамических клапанов, которые устраняют проблему износа трущихся деталей. Преждевременное воспламенение предотвращается охлаждением продуктов сгорания в достаточно тонких и длинных трубках, через которые подаются компоненты горючей смеси. Газодинамические клапаны предотвращают неконтролируемое воспламенение свежих порций горючей смеси горячими продуктами сгорания предыдущего цикла. Это достигается путем охлаждения продуктов сгорания в магистралах подачи до температуры, при которой период индукции воспламенения новой порции горючей смеси превышает время контакта с охлажденными продуктами сгорания. Состояние газовой среды в ДКС по её длине для этого способа организации рабочего процесса показано на рисунке 2, б.

Цикл работы ДКС начинается с ее заполнения смесью горючего газа и окислителя. После воспламенения смеси электрической свечой в процессе горения происходит переход в детонацию, которая распространяется к открытому концу ДКС. Давление в камере сгорания поднимается выше давления внутри магистралей подачи горючего газа и окислителя. Продукты сгорания проникают в магистрали подачи и прерывают подачу горючего газа и окислителя (газодинамические клапаны закрыты). После достижения детонационной волной открытого конца волна разрежения распространяется в продуктах детонации. В определенный момент эта волна разрежения достигнет границы контакта между

продуктами сгорания и компонентами горючей смеси внутри соответствующих магистралей и завершит расширение продуктов сгорания в эти магистрали (газодинамические клапаны открыты). После этого все газы распространяются в сторону открытого конца ДКС. Неконтролируемые воспламенения горючей смеси блокируются продуктами сгорания, охлажденными в магистралах подачи газов. После этого ДКС заполняется горючей смесью снова, и цикл повторяется.

Продувка газом — компонентом горючей смеси. Недостатками описанных выше способов организации рабочего процесса являются увеличенный расход газов и усложнение конструкций ДГУ. Упрощение конструкции достигается при использовании для продувки одного или нескольких газов-компонентов горючей смеси. Одна из первых схем такого назначения показана на рисунке 3 (по а. с. СССР № 629682). В ДГУ использован инжекционный смеситель, смонтированный у закрытого торца ствола 1, имеющий смесительную камеру 2, камеру горючего газа 3, подвижной инжектор 4 с подводом газ-окислителя, связанный с приводом возвратно-поступательного движения 5. При левом положении инжектора истекающая из него струя окислителя (воздуха, кислорода и пр.) эжектирует горючий газ, и они, перемешиваясь в камере 2, поступают в рабочую полость ствола 1. Образующаяся горючая смесь вытесняет остаточные газы и заполняет ствол. Затем привод 5 перемещает инжектор в правое положение, перекрывая проход между камерами 2 и 3. Окислитель, продолжая непрерывно истекать из инжектора, формирует защитную газовую пробку перед воспламенителем 6. Последний инициирует горение. После выгорания горючей смеси поток окислителя вытесняет из ствола продукты сгорания. После перемещения инжектора в левое положение процесс повторяется. Для надежной работы этой схемы ДГУ необходимо обеспечить тщательное сопряжение и гер-

метизацию сочленения инжектора со смесительной камерой. Рассмотренная схема газообмена может быть реализована и с помощью обычных ДУ, имеющих систему механических клапанов, за счет соответствующей организации рабочего цикла процесса ДГН.

Рабочий процесс при частичном заполнении ДКС горючей смесью. Недостатком традиционного напыления покрытий с полным заполнением ДКС горючей смесью являются ограниченные технологические возможности. Частицы порошка при разгоне непосредственно потоком высокотемпературных и высокоскоростных продуктов детонации подвергаются сильному нагреву, а также могут реагировать с окружающими газами. Для ряда напыляемых материалов это может привести к нежелательному изменению их химического состава, микроструктуры и свойств, а для некоторых — к их разложению (например, полимеры). По предложенному в патенте РФ № 2329104 способу ДКС наполняют свежей горючей смесью на части ее длины со стороны закрытого конца, а часть ДКС со стороны открытого конца — негорючим рабочим газом. Порошок подается в зону негорючего рабочего газа, и частицы разгоняют проходящей по негорючему рабочему газу ударной волной. По сути, детонационно-газовый способ нанесения покрытий становится ударно-волновым, в котором разгон частиц порошка производят ударной волной, возбуждаемой в негорючем рабочем газе расширяющимися продуктами детонации детонирующей газовой смеси.

Библиографический список

1. Шоршоров М. Х. *Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий*. М. : Наука, 1978. 224 с.
2. Зверев А. И. *Детонационное напыление покрытий*. Л. : Судостроение, 1979. 232 с.
3. Бартенев С. С. *Детонационные покрытия в машиностроении*. Л. : Машиностроение, 1982. 215 с.
4. *Импульсные детонационные двигатели / под ред. С.М. Фролова*. М. : Торус Пресс, 2006. 592 с.
5. Ro G. D. *Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective // Progress in Energy and Combustion Science*. 2004. Vol. 30. No. 6. Pp. 545–672.

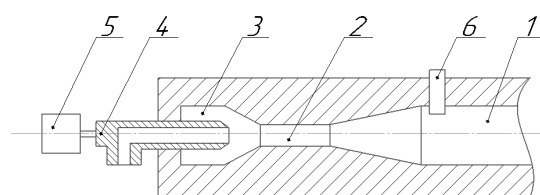


Рисунок 3 — Схема ДГУ с подвижным инжектором

Заключение:

1. Совершенствование и поиск новых способов организации рабочих процессов в пульсирующих детонационно-газовых устройствах для напыления покрытий и других операций позволяет рассчитывать на улучшение технико-экономических показателей и упрощение конструкций оборудования.

2. Для дальнейшего совершенствования детонационно-газовых установок следует провести детальные исследования подготовительных фаз рабочего цикла (смешивания и наполнения рабочих газов, ввода обрабатываемых материалов и инициирования детонации), направленных на повышение надежности, уменьшение расхода материалов.

3. Длительность продувки детонационно-газовых камер сгорания может быть сокращена за счет более рациональной организации продувочного газа при минимальном перемешивании с остаточными продуктами сгорания, а также выбором оптимальной длины продувочной пробки.

4. Следует проанализировать возможности использования различных режимов детонационного горения и применения более дешевых и доступных газов.

6. Харламов Ю. А. Управляемое инициирование газовой детонации // *Вісник Східноукр. нац. университету імені В. Даля*. 2017. № 7 (237). С. 101–113.
7. Николаев Ю. А. Газовая детонация и ее применение в технике и технологиях (обзор) // *Физика горения и взрыва*. 2003. Т. 39. № 4. С. 22–54.
8. Харламов Ю. А. *Детонационно-газовые напылительные струи* : монография. Луганск : изд-во Восточно-укр. нац. ун-та им. В. Даля, 2011. 260 с.
9. Ширяпов Д. И. Применение азота при выполнении предпусковых операций на магистральных газопроводах // *Газовая промышленность*. 2020. № 2. С. 23–30.
10. Анакин А. Т. Оценка параметров пульсирующего детонационного двигателя // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2013. № 3 (41). С. 9–15.
11. Щелоков Я. М. *Пособие по освоению систем релаксационного вибрационного горения*. Казань : Изд-во КГУ, 1971. 80 с.
12. Моин Ф. В. Явление заброса пламени при горении предварительно перемешанных газов в проточной системе // *ФГВ*. 1968. № 2. С. 209–214.
13. Федько Ю. П. *Исследование процесса нанесения и свойств окисных детонационных покрытий* : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 1980. 19 с.
14. Федько Ю. П. *Физические основы конструирования бесклапанных дозаторов детонирующей смеси газов* // *Детонационные покрытия*. Калинин, 1980. С. 54–63.

© Харламов Ю. А., Вишневикий Д. А., Петров П. А.

© Бочаров А. В.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ им. Седуша В. Я.
ДонНТУ Еронько С. П.,
к.т.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТУ Зинченко А. М.*

Статья поступила в редакцию 22.05.2023.

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

ORGANIZATION OF THE WORKFLOW OF PULSATING DETONATION-GAS DEVICES FOR TECHNOLOGICAL PURPOSES

The article is devoted to the analysis of the working cycle of pulsating process of detonation-gas spraying and possible directions for their improvement, which allows us to reckon on the improvement of technical and economic indicators and simplification of equipment designs. The duration of blowing of detonation-gas combustion chambers can be reduced due to a more rational organization of purge gas supply with minimal mixing with residual combustion products, as well as the choice of the optimal length of the purge plug. The full cycle of operation of detonation-gas spraying units is given, expressed in a sequence of eight phases in a single cycle of operation.

Key words: *detonation-gas installations, surface spraying, purging plug, pulsating gas spraying process, spark source, oxidizer.*

References

1. Shorshorov M. Kh. *Physical and chemical bases of detonation gas spraying coatings [Fiziko-khimicheskie osnovy detonacionno-gazovogo napylenia pokrytij]*. M.: Science, 1978. 224 p. (rus)
2. Zverev A. I. *Detonation spraying of coatings [Detonatsionnoe napylenie pokrytij]*. L.: Shipbuilding, 1979. 232 p. (rus)
3. Bartenev S. S. *Detonation coatings in mechanical engineering [Detonacionnyye pokrytiya v mashinostroyenii]*. L.: Mechanical Engineering, 1982. 215 p. (rus)

4. Pulse detonation engines eds. S. M. Frolova [Impul'snyye detonacionnyye dvigateli pod red. S. M. Frolova]. M.: Torus Press, 2006. 592 p. (rus)
5. Ro G. D. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2004. Vol. 30. No. 6. Pp. 545–672.
6. Kharlamov Yu. A. Controlled initiation of gas detonation [Upravlyаемое iniciirovanie gazovoj detonacii]. *Bulletin of East-Ukrainian National University*. 2017. No. 7 (237). Pp. 101–113. (rus)
7. Nickolaiev Yu. A. Gas detonation and its applications in technology (overview) [Gazovaya detonaciya i ee primeneniye v tekhnike i tekhnologiyah (obzor)]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2003. Vol. 39. No. 4. Pp. 22–54. (rus)
8. Kharlamov Yu. A. Detonation-gaz spray jets: monograph [Detonacionno-gazovye napylitel'nye strui: monografiya]. Lugansk: Publishing House of East-Ukrainian National University named after V. Dahl, 2011. 260 p. (rus)
9. Shirapov D. I. Application of nitrogen in pre-launch operations on main gas pipelines [Detonacionno-gazovye napylitel'nye strui: monografiya]. *Gas Industry Journal*. 2020. No. 2. Pp. 23–30. (rus)
10. Anakin A. T. Evaluation of the pulse detonation engine [Ocenka parametrov pul'siruyushchego detonacionnogo dvigatelya]. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2013. No. 3 (41). Pp. 9–15. (rus)
11. Shchelokov Ya. M. Manual for the development of relaxation vibration combustion systems [Posobie po osvoeniyu sistem relaksacionnogo vibracionnogo gorenija]. Kazan: Publishing House of KSU, 1971. 80 p. (rus)
12. Moin F. V. The phenomenon of flame throttle during the combustion of pre-mixed gases in the flow system [Yavlenie zabrosa plameni pri gorenii predvaritel'no peremeshannykh gazov v protochnoj sisteme]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 1968. No. 2. Pp. 209–214. (rus)
13. Fed'ko Yu. P. Study of the process of application and properties of oxidative detonation coatings: synopsis of a thesis of PhD in Engineering [Issledovanie processa naneseniya i svoystv okisnykh detonacionnykh pokrytij: autof. dissert. kand. tekhn. nauk]. 1980. 19 p. (rus)
14. Fed'ko Yu. P. Physical basis of design of valve-free blasting gas dispensers [Fizicheskie osnovy konstruirovaniya besklapannykh dozatorov detoniruyushchej smesi gazov]. *Detonacionnyye pokrytiya*. Kalinin, 1980. Pp. 54–63. (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

Вишневский Дмитрий 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

Бочаров Александр Викторович, канд. техн. наук, доцент каф. металлургического оборудования Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, РФ