

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-82-90>

УДК 621.793.7

ГАЗООБМІН У ДЕТОНАЦІЙНО-ГАЗОВИХ ПРИСТРОЯХ ДЛЯ НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ

Харламов Ю.О., Міщик А.В., Романченко О.В.

GAS EXCHANGE IN D-GUN'S DEVICES FOR COATING SPRAYING

Kharlamov Y.O., Mitsyk A.V., Romanchenko O.V.

Основні вимоги до детонаційно-газових установок (ДГУ) для напилення покриттів – вибухобезпечність, екологічність, стабільність роботи, висока продуктивність та ін. При технологічному застосуванні газової детонації доводиться розв'язувати проблеми швидкого та якісного змішування компонентів суміші, надійного ініціювання детонації, охолодження установок, враховувати межі детонації, міцність та вагу апаратів тощо. Етапи робочого циклу ДГУ, в тому числі процеси газообміну в детонаційних камерах згоряння, що забезпечують наповнення їх свіжою горючою сумішшю і порошком з попереднім витісненням залишкових продуктів згоряння, визначають вихідний стан свіжого заряду, що впливає на інтенсивність і характер фізико-хімічних перетворень, і цим на умови формування покриттів. Ця стаття присвячена систематизації та аналізу принципів організації газообміну в робочих камерах згоряння детонаційно-газових установок для напилення покриттів, включаючи аналіз та систематизацію конструкцій детонаційно-газових установок для напилення покриттів, що працюють з різними структурами робочого циклу, з виявленням принципових схем та закономірностей газообміну в робочих камерах згоряння. До основних схем газообміну віднесені наступні: з виштовхуванням залишкових продуктів згоряння продувним газом або компонентом горючої суміші; з виштовхуванням залишкових продуктів згоряння свіжою горючою сумішшю; з відкачування залишкових продуктів згоряння; комбінований газообмін з відкачуванням та продуванням залишкових продуктів згоряння; із поперечним рухом газів; зі змінним складом свіжої горючої суміші. За способом видалення залишкових газів слід розрізняти: продування стовбура інертними газами з подальшою подачею (виштовхуванням інертного газу) свіжою горючою сумішшю газів; продування стовбура повітрям або киснем з подальшою подачею свіжої горючої суміші; подача свіжої горючої суміші з безпосереднім виштовхуванням нею продуктів згоряння; подача свіжої паливної суміші з безпосереднім виштовхуванням нею продуктів згоряння через проміжну газову пробку невеликої довжини; відкачування залишкових газів зі стовбура для створення розрідження (вакууму) з наступним заповненням свіжою горючою сумішшю газів; поєднання продування (виштовхування) залишкових газів з відкачуванням. За напрямком потоку свіжої горючої суміші розрізняють її подачу: за

напрямом течії продуктів згоряння; назустріч напрямку течії продуктів згоряння; уперек напрямку течії продуктів згоряння; поєднанням зазначених вище прийомів. За місцем введення свіжої паливної суміші в стовбур розрізняють її подачу: біля закритого торця; біля відкритого торця; в середній частині стовбура; одночасно по всій довжині стовбура; поєднанням зазначених вище прийомів. Розглянуто схеми газообміну з різною циклічністю подачі газів.

Ключові слова: газообмін; горюча суміш; детонаційно-газове напилення; залишкові продукти згоряння; покриття; продувний газ; змішування газів.

Вступ. Детонація – найефективніший з усіх можливих способів прямого спалювання речовини. Саме тому нині у всьому світі активно розгортаються науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи з використання керованої детонації у нових системах реактивного руху, енергетичних установках та технологічних пальниках [1, 2].

Швидкість спалювання палива, надзвукова швидкість процесу, висока температура та підвищений тиск продуктів визначають галузі технічного використання газової детонації. Основні вимоги до детонаційно-газових установок (ДГУ) – це вибухобезпека та екологічність, стабільність роботи та висока продуктивність. При технологічному застосуванні газової детонації доводиться розв'язувати проблеми швидкого та якісного змішування компонентів суміші, надійного ініціювання детонації, охолодження установок, враховувати межі детонації, міцність та вагу апаратів тощо. [2 – 4].

Одним з перших найважливіших і добре розвинутих нині застосувань газової детонації є нанесення зносостійких, теплозахисних, електроізоляційних та інших видів порошкових покриттів на зовнішні поверхні деталей різного призначення. Суть детонаційно-газового методу напилення (ДГН), вперше запропонованого на фірмі Linde Company в середині XX століття [5, 6], полягає у нагріванні та метанні

порошкових частинок на оброблювану поверхню за допомогою газової детонації. Відсутність технологій отримання твердих зносостійких покриттів у СРСР стимулювало самостійну розробку та розвиток детонаційно-газового напилення у 1960-ті роки [5 – 7]. Детонаційно-газове напилення стало першим методом високошвидкісного газотермічного нанесення покриттів та стимулювало світову тенденцію до розробки інших високошвидкісних способів – високошвидкісного газополум'яного та плазмового, газодинамічного та ін.

Зараз розроблено та освоєно технологію ДГН покриттів з багатьох видів порошків, безперервно ведуться роботи з розширення їх номенклатури та областей застосування. Виконані та продовжують розвиватися теоретико-експериментальні дослідження, спрямовані на створення наукової бази для проєктування оптимальних технологічних процесів та обладнання для ДГН. Створено детонаційно-газові установки для нанесення покриттів (ДГУ), що відрізняються принципом дії та конструктивним виконанням. У зв'язку з цим розвиваються роботи з оцінки технологічних можливостей, переваг та недоліків окремих варіантів ДГН, створення обґрунтованих рекомендацій щодо їх застосування та подальшого вдосконалення.

Все більшу увагу при аналізі та розробці ДГН приділяється системному підходу. Якщо раніше вивчалися основні етапи робочого циклу ДГН – нагрівання та рух частинок порошку в потоці продуктів газової детонації, взаємодія частинок порошку з підкладкою, то зараз приділяють більш ретельну увагу аналізу структури робочого циклу ДГН загалом та всіх його етапів. Однак, ряд етапів робочого циклу ДГУ, наприклад, процеси газообміну в детонаційних камерах згоряння, що забезпечують наповнення їх свіжою горючою сумішшю та порошком з попереднім витісненням залишкових продуктів згоряння, визначають вихідний стан свіжого заряду, що впливає на інтенсивність та характер фізико-хімічних перетворень, які протікають у частинках порошку, та на умови формування покриттів практично не вивчені [5].

Метою статті є вивчення, аналіз та систематизація конструкцій детонаційно-газових установок для напилення покриттів, що працюють з різними структурами робочого циклу, з виявленням схем і закономірностей газообміну в робочих камерах згоряння.

Результати дослідження.

Класифікація схем газообміну. У перших патентах з детонаційно-газового напилення закладено продування стовбура інертними газами у напрямку від закритого торця до відкритого з подальшою аналогічною подачею свіжої горючої суміші газів. Проте питання газообміну в стовбурах ДГУ залишається недостатньо опрацьованим. Спрощений теоретичний аналіз газообміну було виконано раніше [5]

За способом газообміну (видалення залишкових газів) слід розрізняти: 1) продування стовбура

інертними газами з подальшою подачею (виштовхуванням інертного газу) свіжою горючою сумішшю газів; 2) продування стовбура повітрям або киснем з подальшою подачею свіжої горючої суміші; 3) подача свіжої горючої суміші з безпосереднім виштовхуванням нею продуктів згоряння; 4) подача свіжої горючої суміші з безпосереднім виштовхуванням нею продуктів згоряння через проміжний газовий затвор невеликої довжини; 5) відкачування залишкових газів зі стовбура для створення розрідження (вакууму) з подальшим заповненням свіжою горючою сумішшю газів; 6) поєднання продування (виштовхування) залишкових газів з відкачуванням.

У напрямку потоку свіжої горючої суміші слід розрізняти її подачу: 1) у напрямку витікання продуктів згоряння; 2) назустріч напрямку витікання продуктів згоряння; 3) уперек напрямку витікання продуктів згоряння; 4) поєднанням зазначених вище способів.

За місцем введення свіжої горючої суміші розрізняють подачу: 1) біля закритого торця; 2) біля відкритого торця; 3) у середній частині стовбура; 4) одночасно по всій довжині стовбура; 5) поєднанням зазначених вище способів.

Газообмін із виштовхуванням залишкових продуктів згоряння продувним газом або компонентом горючої суміші. Продування стовбура інертними газами дозволяє забезпечити повне витіснення залишкових газів, що містять продукти згоряння і частинки порошку, додаткове охолодження стінок стовбура, а при достатній витраті й тривалості подачі та охолодження виробу, що напилюється, виключає перемішування свіжої горючої суміші з продуктами згоряння. Підбором складу продувного газу можна якоюсь мірою управляти характером перемішування свіжої горючої суміші з газом, що витісняється. Належною побудовою циклограми робочого циклу процесу досягається захист за допомогою продувного газу від зворотного удару полум'я. Недоліками цього способу є збільшена витрата газів та ускладнення конструкції ДГУ. Спрощення конструкції досягається при використанні для продування одного або кількох газів-компонентів паливної суміші. Одна із перших схем такого призначення показана на рис. 1 [8]. У ДГУ використаний інжекційний змішувач, змонтований біля закритого торця стовбура 1, що має змішувальну камеру 2, камеру пального газу 3, рухомий інжектор 4 з підведенням газу-окислювача і пов'язаний з приводом зворотно-поступального руху 5. При лівому положенні інжектора струмінь окислювача (повітря, кисню, їх суміші та ін.), що витікає з нього, ежектуює горючий газ, які, перемішуючись в камері 2, надходять в робочу порожнину стовбура 1. Горюча суміш, що утворюється, витісняє залишкові гази та заповнює стовбур. Потім привід 5 переміщує інжектор у праве положення, перекриваючи прохід між камерами 2 і 3. Окислювач, продовжуючи безперервно витікати з інжектора, формує газову захисну пробку перед запалювачем 6. Останній ініціює горіння. Після виго-

ряння паливної суміші потік окислювача витісняє зі стовбура продукти згоряння. Після переміщення інжектора у ліве положення процес повторюється. Для надійної роботи цієї схеми ДГУ необхідно забезпечити ретельне сполучення та герметизацію зчленування інжектора зі змішувальною камерою. Розглянута схема газообміну може бути реалізована за допомогою звичайних ДУ, що мають систему механічних клапанів, шляхом відповідної організації робочого циклу процесу ДГН.

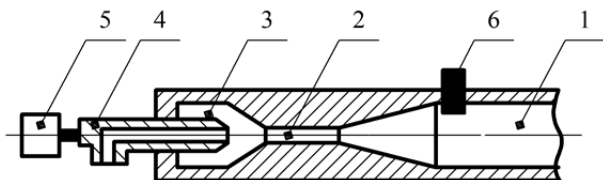


Рис. 1. Основні параметри та види стану границі розділу газотермічного покриття з основним матеріалом виробу

Газообмін із виштовхуванням залишкових продуктів згоряння свіжою горючою сумішшю. Подача свіжої горючої суміші з безпосереднім виштовхуванням нею продуктів згоряння реалізується або при безперервному введенні її в камеру згоряння або при її пульсуючій подачі. У першому випадку умови введення горючої суміші повинні бути узгоджені з умовами проскакування полум'я. Теорія проскоку полум'я дана на роботах [9 – 11]. Для бідних ацетиленокисневих сумішей при використанні горючих газів-замінників ацетилену і паливно-повітряних сумішей можуть застосовуватися, як правило, звичайні інжекційні змішувачі, що використовуються при газополум'яній обробці. Питання безперервного введення горючої суміші в стовбур розглянуті також у роботах [12 – 14]. На основі аналізу процесів, супутніх детонації газів у трубах, запропоновано вводити газову суміш у ствол ДГУ через сопло з використанням принципу інжекторного змішування горючого газу та кисню [14, 15]. При розмірах сопла, що забезпечують закінчення суміші в режимі відриву полум'я, і розташування його перпендикулярно до осі стовбура проникнення детонації в зону інжекції (зворотний удар) відсутнє. Завдяки використанню кисню, як несучого газу, з підсмоктуванням ацетилену низького тиску забезпечується локалізація горіння в зоні інжектора у разі аварійного прориву полум'я через сопло та усунення аварійної ситуації шляхом зриву інжекції шляхом подачі азоту в зону інжекції (об'єм газу, що вводиться, не перевищує 5 % об'єму стовбура). У другому випадку використовують клапани або інші системи, що забезпечують переривання подачі свіжої суміші під час її вигорання та охолодження продуктів згоряння.

Газообмін із відкачуванням залишкових продуктів згоряння. Відкачування залишкових газів зі стовбура є новим недостатньо опрацьованим напрямком у газообміні ДГУ. На рис. 2, а показана одна з можливих конструктивних схем [16]. Середня частина камери згоряння через клапан 2 приєднана до

системи відкачування 3. Біля вихідного кінця камери згоряння встановлена приводна запірна заслінка 4. Біля закритого торця камера з'єднана з системою подачі газів 5. При закритій заслінці 4 проводять відкачування залишкових газів зі стовбура, а потім заповнюють його свіжою горючою сумішшю газів та порошком, відкривають заслінку та ініціюють горіння запалювачем 6. При відкачуванні залишкових газів забезпечується більш однорідне заповнення стовбура горючою сумішшю, виключається натікання гарячих продуктів згоряння з частинками порошку, що залишилися, при газообміні на напилуваний виріб. У багатосекційних стовбурах відкачування можуть піддаватися окремі секції [17].

Комбінований газообмін з відкачуванням та продуванням залишкових продуктів згоряння. Поєднання продування з відкачуванням стовбура досягається при використанні інжекторного принципу відкачування [18], схема якого показана на рис. 2, б, в. Вихідна частина ствола 1 забезпечена кільцевою порожниною, з'єднаною із системою подачі інжектуючого газу і кільцевою щілиною з виходом на бічні стінки ствола (рис. 2, б) або на торцеву поверхню зрізу ствола (рис. 2, в). Інжектуючий газ витікає з кільцевої щілини з великою швидкістю, інжектуює газ зі стовбура, створюючи в ньому розрідження і забезпечуючи таким чином відкачування залишкових газів і швидше їх видалення, і заміну свіжою горючою сумішшю. Недоліком цієї схеми є викид пилових забруднень на підкладку зі збільшеною швидкістю, що може негативно позначитися на якості покриттів, що наносяться. Тому у ряді випадків може бути ефективнішим підключення кільцевої порожнини в наведених вище схемах до системи відкачування, тобто у цьому випадку через кільцеву щілину здійснюватиметься безпосередній відбір залишкових газів. Відкачування може здійснюватися через отвір у стінках стовбура (рис. 2, г) та кільцеву щілину, спрямовану до закритого торця стовбура (рис. 2, д). В останньому випадку вихідна частина стовбура може мати дещо збільшений діаметр. Перевага цієї схеми полягає в усуненні впливу потоку з підкладкою, який витісняється зі стовбура, а при відкачуванні, що діє безперервно, буде частково видалятися хвостова низькошвидкісна частина імпульсного двофазного потоку.

Якщо відкачування стовбура здійснювати в середній частині, як показано на рис. 2, е, забезпечуються стабільні умови роботи з недозаповненням стовбура. Тут 1 – порожнина відкачування, з'єднана зі стовбуром 2 і системою відкачування 3, 4 – система подачі горючої суміші.

Для організації протитечії горючої суміші та порошкової хмаринки при наповненні стовбура можна здійснювати відкачування біля закритого торця, а введення свіжої горючої суміші у вихідного кінця. Подібний варіант зображено на рис. 2, д, де 1 – стовбур, 2 – запірний клапан, 3 – система відкачування, 4 – кільцева камера біля вихідного кінця стовбура, з'єднана з системою подачі газів 5. Ця ж схема може

використовуватися при використанні повітряних сумішей шляхом подачі горючого газу в кільцеву порожнину 4 і перемішування його з повітрям, що інжектується з навколишнього середовища.

На рис. 2, к показана схема ДГУ з введенням 1 свіжої горючої суміші в середню частину стовбура 2 з роздвоєнням потоку у напрямку до закритого кінця з системою відкачування 3 і вихідного торця. Цим можна суттєво скоротити час наповнення стовбура.

Газообмін із поперечним рухом газів. Для підвищення скорострільності ДГУ та покращення газообміну може бути використаний поперечний рух газів. Три можливі варіанти показані на рис. 2. Перший (рис. 2, л) передбачає з'єднання робочої порожнини стовбура 1 з системами відкачування 2 і подачі свіжої суміші 3 через отвори в стінках стовбура.

Другий варіант (рис. 2, м) передбачає наявність у стовбурі протилежно розташованих поздовжніх щілин для введення та видалення газів. Третій варіант (рис. 2, н) передбачає виконання протилежно розташованих стінок 1 камери згоряння 2 пористими (газопроникними), одна з яких відокремлює камеру згоряння від порожнини наповнення 3, друга – від порожнини відкачування або приймання залишкових газів 4. Цим забезпечується можливість не тільки газообміну з поперечним рухом газів, а також організації пористого охолодження шляхом відповідної організації циклу робочого процесу напilenня. Можлива також подача через порожнини 3 та 4 компонентів горючої суміші з наступним змішуванням їх у камері згоряння.

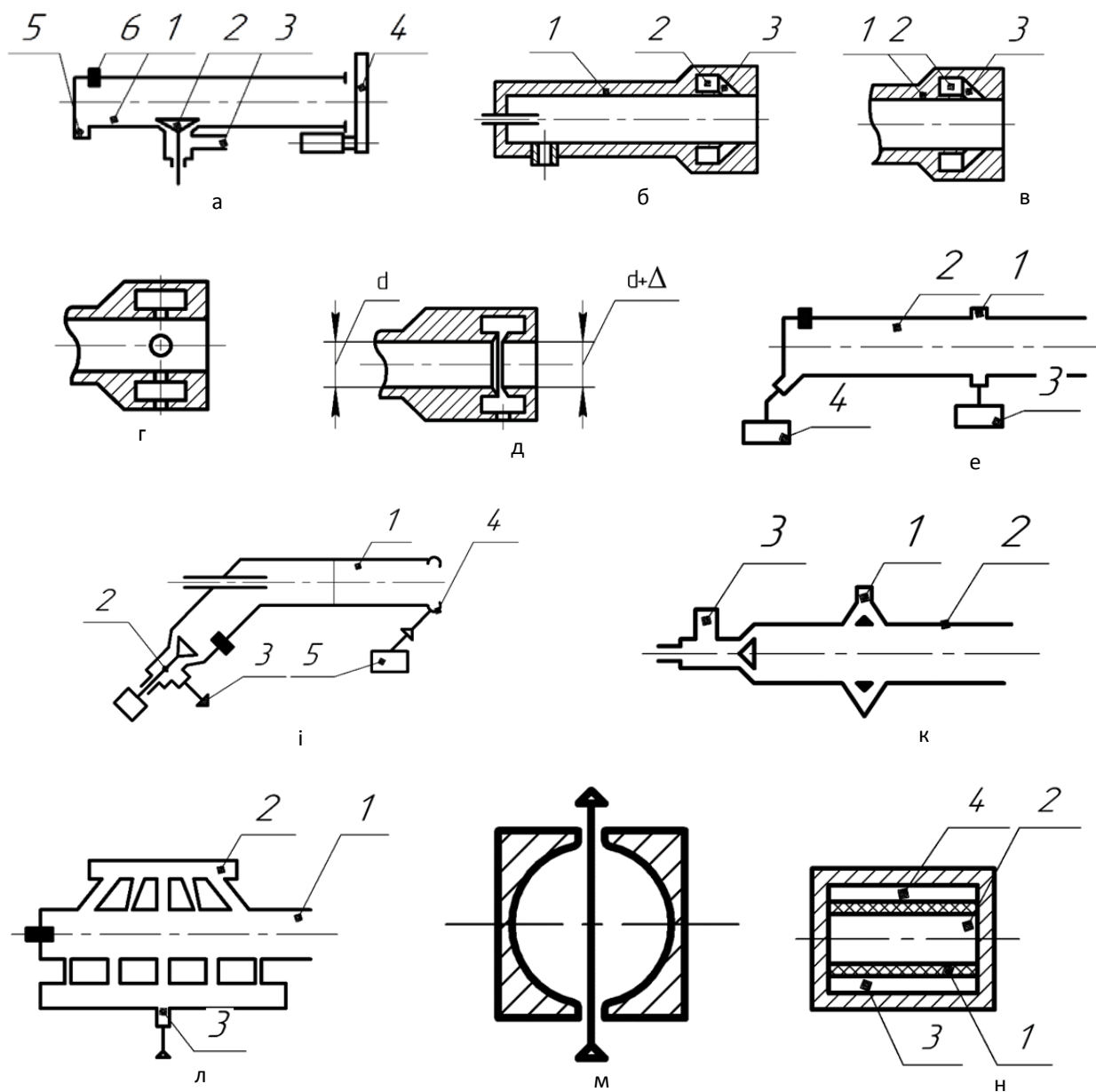


Рис. 2. Схеми газообміну в робочих камерах детонаційно-газових установок

На рис. 3 показана комбінована схема газообміну, коли один із компонентів горючої суміші подається від закритого торця до відкритого кінця стовбура, а інший через пористі стінки в поперечному напрямку.

У багатьох розглянутих схемах можуть бути передбачені різні завихрювачі та турбулізатори, що сприяють покращенню якості газообміну.

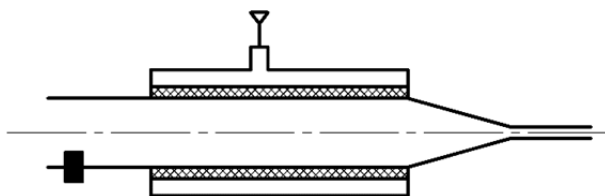


Рис. 3. Схема комбінованого газообміну у стволі ДГУ

Циклічність подачі газів. Класифікацію схем подачі газів до ДГУ за циклічностями було розглянуто раніше [19, 20]. Проте пізніше запропоновані ДГУ з безперервним сумішоутворенням [21 – 23] для багатостовбурних установок, тобто можливі

схеми з циклічною подачею у відвід заздалегідь підготовленої горючої суміші у загальному змішувачі. Інша додаткова схема пов'язана з циклічною подачею тільки горючого газу, а як окислювач використовується повітря, що інjektується безпосередньо з повітряної атмосфери [24, 25]. Третя додаткова схема пов'язана з використанням розроблюваного об'ємного принципу дозування [26 – 29], тобто з попереднім заповненням дозувальних ємностей газами та наступним напуском їх у стовбур.

Основні можливі варіанти циклічності подачі газів схематично показано на рис. 4. Вибір схеми подачі газів визначається в основному складом та характеристиками процесу горіння обраної горючої суміші, а також конструктивними особливостями газорозподільного механізму. Перша схема забезпечує найбільш економічне використання робочих газів, проте вимагає застосування приводних клапанів у газорозподільному механізмі, що знижує надійність ДГУ, ускладнює переналадження циклограми процесу. Тому робляться спроби створення простіших та надійних схем газорозподілу.

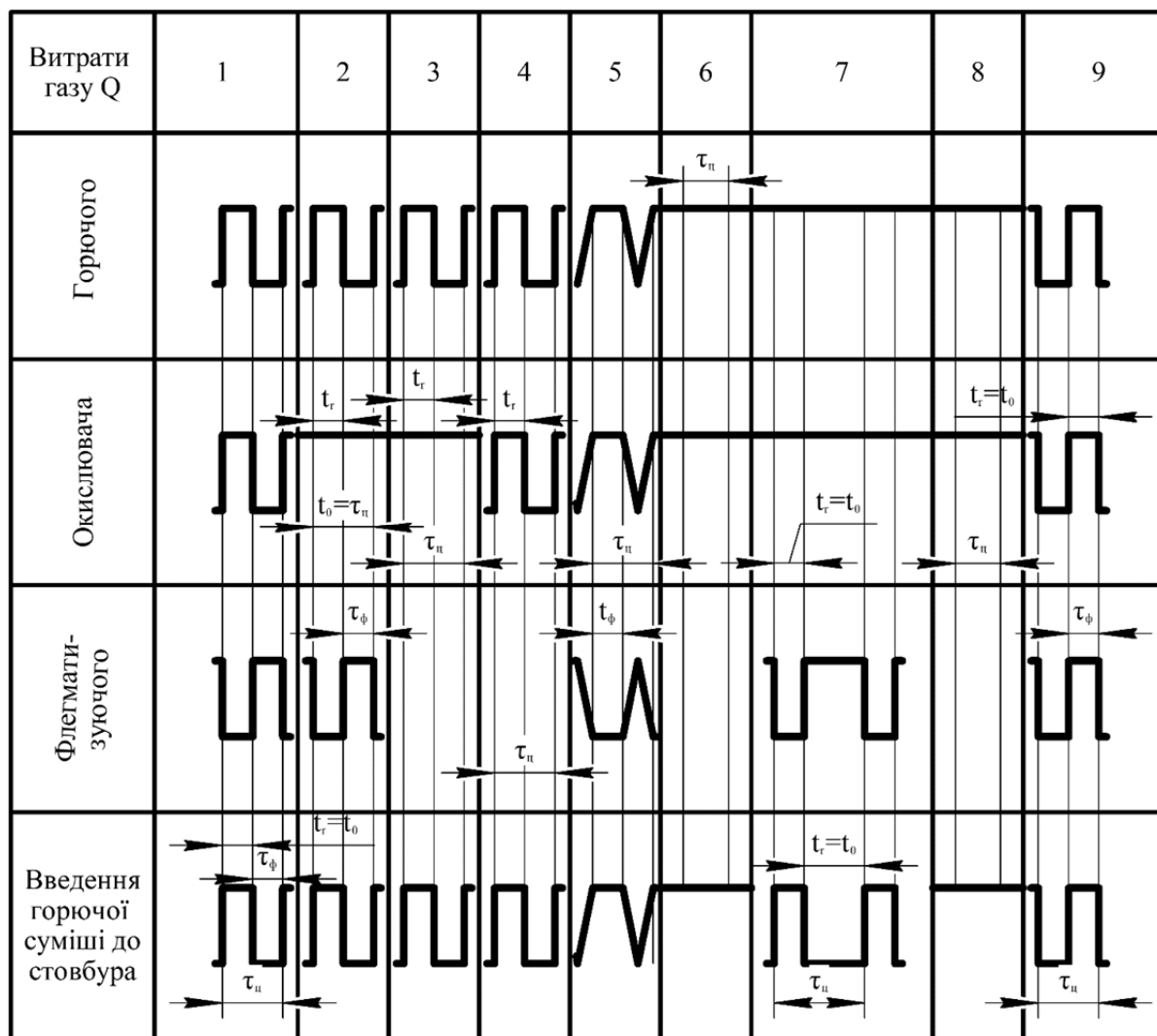


Рис. 4. Варіанти схем подачі в стовбур за циклічності

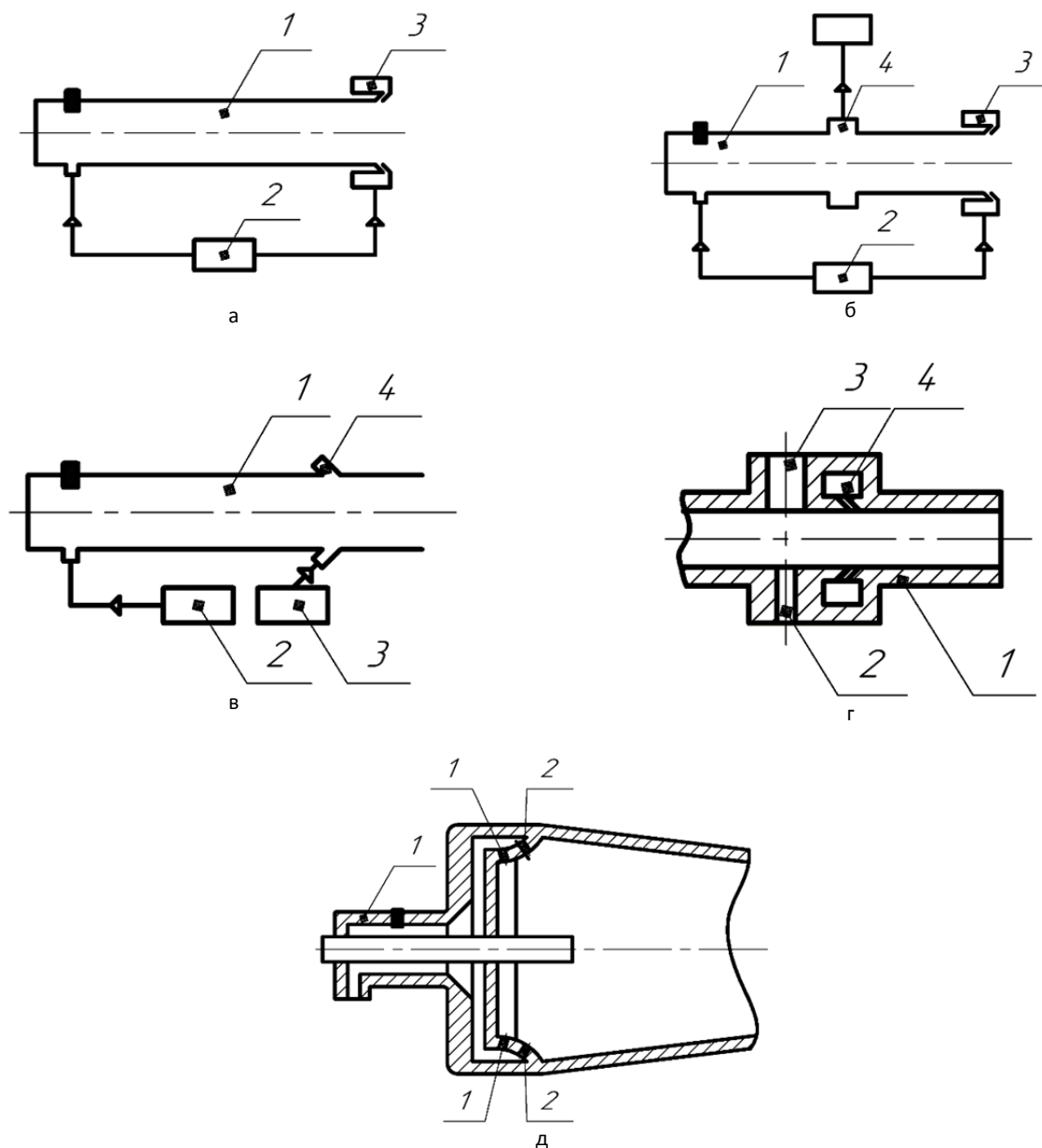


Рис. 5. Схеми наповнення стовбура свіжою горючою сумішшю

Друга схема відрізняється безперервною подачею окислювача (кисню, повітря) та поперемінним введенням горючого та флегматизуючого (азоту або повітря) газів. В одній з конструкцій це реалізовано у простому газорозподільному механізмі, виконаному у вигляді рухомого елемента-штока, торці якого поперемінно перекривають трубопровід подачі азоту та кільцеву щілину подачі ацетилену. Кисень подається у відвід через інжекційний змішувач безперервним потоком, при цьому протягом більшої частини робочого циклу він утворює горючу суміш, а потім спільно з азотом бере участь в утворенні запобіжної «пробки» та продувці стовбура від залишкових газів.

Третя схема характеризується безперервною подачею окислювача та переривчастою подачею горючого газу. Роздільна газова пробка між продуктами згоряння та свіжою горючою сумішшю формується з

окислювача. Найбільш просто це реалізується у конструкції шляхом поєднання функцій інжекційного змішувача з клапаном подачі горючої суміші. Інжектор подачі окислювача виконано рухомим, а його торцева поверхня і конусна частина приймальної камери зсуву – сполучними для періодичного перекриття горючого газу [19].

За четвертою схемою здійснюється циклічна одночасна подача горючого газу та окислювача. Застосування її обмежено низькою скорострільністю і важко займистими горючими сумішшями.

У пристроях з безперервним введенням газів-компонентів горючої суміші потік горючої суміші, що утворюється, може циклічно розсікатися пробкою флегматизуючого газу, що утворюється біля закритого торця і стовбура. Це використовується у 5-й схемі та реалізовано у ДГУ конструкції ІПМ АН УРСР (м. Київ).

При безперервній подачі горючої суміші без застосування інертного газу (6-а схема) ДГУ працює без запобіжної (роздільної) пробки між продуктами згоряння та свіжою горючою сумішшю. Для локалізації згоряння горючої суміші у стовбурі застосовують різні види вогнеперешкоджувачів та полум'ягасників. Для багатьох сумішей достатньо використання інжекційного змішувача, змонтованого на стовбурі у місці введення горючої суміші.

Слід розрізняти також подачу горючої суміші або її компонентів безпосередньо в камеру згоряння стовбура або через проміжні камери та порожнини, створювані для форкамерного запалення, локалізації горіння, поліпшення якості газообміну та ін. Ряд схем подачі горючої суміші в стовбур було розглянуто раніше [19].

Відомо принцип наповнення стовбура свіжою горючою сумішшю зустрічними струменями (рис. 5, а). Камера згоряння 1 стовбура з'єднана з системою подачі горючої суміші у закритого торця і біля вихідного кінця через кільцеву порожнину 3. Цим може бути досягнуто не тільки прискорення наповнення стовбура, а й підвищення вихідного тиску паливної суміші в стовбурі перед згорянням. Більш ефективна реалізація цього способу досягається при відкачуванні залишкових газів у середній частині стовбура. Для цього ДГУ додатково забезпечується системою відкачування 5, з'єднаною з кільцевою порожниною відкачування 4 в середній частині стовбура (рис. 5, б).

Газообмін зі змінним складом свіжої горючої суміші. Для регулювання характеру та інтенсивності взаємодії порошку з продуктами згоряння можна використовувати процес напilenня зі змінним по довжині стовбура складом горючої суміші. Одна з можливих схем цього способу показана на рис. 5, в. Стовбур 1 з'єднаний з системами подачі горючих сумішей 2 і 3, з першою у закритого торця, з другою в середній частині через кільцеву щілину 4, що забезпечує витікання в напрямку вихідного кінця стовбура. Ця ж схема може бути використана для прискорення розвитку детонаційного згоряння сумішей, що важко детонують шляхом введення в початкову ділянку стовбура ацетиленокисневої суміші. При необхідності для реалізації певних режимів напilenня у вихідну частину стовбура можуть вводитися й окремі компоненти горючої суміші або газозавис порошку, що розпилюється.

При змінному контрольованому складі газів по довжині стовбура, щоб уникнути їх перемішування в перехідній зоні та забезпечення різкішого переходу складів застосовують поперечні струмені газу в стовбурі. Одна із можливих схем показана на рис. 5, г [117]. Середня частина стовбура 1 має протилежно розташовані вхідну 2 і вихідну 3 поперечні плоскі щілини з виходом, наприклад, плоского струменя, що утворюється в навколишнє середовище. При заповненні початкової ділянки стовбура горючою сумішшю її надлишки будуть видалятися поперечним струменем у навколишнє середовище. Через кільце-

ву порожнину 4 заповнюється вихідна частина стовбура.

За наявності камери запалення (форкамери) горюча суміш може безпосередньо вводиться в стовбур і камеру запалення, або надходити в стовбур через камеру запалення. Прикладом можуть бути стовбури зі змінним перерізом і для напilenня циліндричними детонаційними хвилями (рис. 5, д).

Висновки

Процеси газообміну відіграють важливу роль у протіканні одиничного робочого циклу пульсуючих процесів детонаційно-газового напilenня. Нагрів та прискорення напильованих частинок порошку визначаються впливом на них детонаційної хвилі та супутнього імпульсного потоку продуктів газової детонації. Своєю чергою параметри останнього залежать від складу та інших параметрів свіжого заряду горючої суміші у стовбурі детонаційно-газової установки.

Представляється доцільною постановка та проведення теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на вдосконалення процесів газообміну в робочих камерах згоряння детонаційно-газових установок для напilenня покриттів.

Література

1. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective / G.D. Roy, S.M. Frolov, A.A. Borisov, D.W. Netzer. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30 (2004) pp. 545 – 672.
2. Інноваційні можливості газової детонації / Харламов Ю.О., Полонський Л.Г., Балицька Н.О., Клименко С.А. *Наука та інновації*, 2020, т. 16, № 6. С. 105 – 112.
3. Харламов Ю.А. Детонационно-газовые процессы в промышленности / Ю.А. Харламов, Н.А. Будагянц; Восточноукр. гос. ун-т. Луганск: Изд-во ВУГУ, 1998. 223 с.
4. Баженова Т.В., Голуб В.В. Использование газовой детонации в управляемом частотном режиме. *Физика горения и взрыва*. 2003. Т. 39, № 4. С. 3 – 21.
5. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напilenня покрытий. М.: Наука, 1978. 224 с.
6. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. Киев: Наукова думка, 1987. 544 с.
7. Шестерненко В.И. Детонационное нанесение покрытий. *Порошковая металлургия*, 1968, № 1. С. 37 – 46.
8. А.с. 629682 (СССР). Устройство для детонационного напilenня покрытий. Ю.А. Харламов, Ю.И. Писклов, Н.М. Рыбалка, О.И. Малышев.
9. Щелоков Я.М., Телегин Э.М., Подымов В.Н. Пособие по освоению систем релаксационного вибрационного горения. Казань: Изд-во КГУ, 1971. 80 с.
10. Моин Ф.В., Шевчук В.У. Явление заброса пламени при горении предварительно перемешанных газов в проточной системе – ФГВ, 1968, № 2. С. 209 – 214.
11. Левин А.М., Брюханов О.Н. Влияние температуры стенок огневого канала на условия возникновения проскока пламени. *Газовая промышленность*, 1963, № 10.

12. Бартенев С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1982. 215 с.
13. Федько Ю.П. Исследование процесса нанесения и свойств окисных детонационных покрытий. Автореф. диссер. канд. техн. наук. М.: 1980. 20 с.
14. Федько Ю.П., Бартенев С.С., Неделько В.Е. Физические основы конструирования бесклапанных дозаторов детонирующей смеси газов. *Детонационные покрытия*. Калинин, 1980. с. 54 – 63.
15. А.с. 508994 (СССР). Установка для нанесения порошковых материалов детонационным методом. Ю.П. Федько.
16. А.с. 539400 (СССР). Устройство для детонационного нанесения покрытий. Ю.А. Харламов.
17. А.с. 769853 (СССР). Устройство для детонационного напыления покрытий. Ю.А. Харламов.
18. А.с. 980318 (СССР). Устройство для детонационного напыления покрытий. Ю.И. Писклов, Ю.А. Харламов.
19. Детонационно-газовая аппаратура для напыления покрытий / Ю.А. Харламов, М.Х. Шоршоров, Ю.И. Писклов, Б.Л. Рябошапко. М.: ИМЕТ АН СССР, 1980. 65 с.
20. Харламов Ю.А., Писклов Ю.И., Рябошапко Б.Л. Оптимизация конструкции детонационно-газовой установки для нанесения покрытий. *Защитные покрытия на металлах*, вып. 16. Киев: Наукова думка, 1982, с. 62 – 64.
21. А.с. 705734 (СССР). Устройство для детонационного нанесения порошковых материалов Тверь-2. Л.Т. Гордеева, А.М. Зингер, В.И. Смирнов и др.
22. А.с. 690688 (СССР). Устройство для детонационного нанесения порошковых материалов Тверь-3. Л.Т. Гордеева, А.М. Зингер, В.И. Смирнов и др.
23. А.с. 736442 (СССР). Установка для детонационного нанесения покрытий. Ю.А. Харламов.
24. А.с. 736440 (СССР). Устройство для детонационного напыления покрытий. Ю.А. Харламов.
25. А.с. 752894 (СССР). Детонационная установка для напыления покрытий. Ю.А. Харламов.
26. Пути повышения точности автоматического дозирования компонентов детонационно-газовой смеси. А.М. Зингер, Л.Т. Гордеева, В.И. Смирнов и др. *Детонационные покрытия*. Калинин, 1980, с. 42 – 53.
27. А.с. 656252 (СССР). Установка Тверь-1 для детонационного нанесения порошковых материалов. А.М. Зингер, Л.Т. Гордеева, В.И. Смирнов, В.А. Тютяев.
28. А.с. 720859 (СССР). Устройство для детонационного нанесения порошковых материалов/ Л.Т. Гордеева, А.М. Зингер, В.И. Смирнов и др.
29. А.с. 666712 (СССР). Устройство для детонационного нанесения порошковых материалов. Л.Т. Гордеева, А.М. Зингер, В.И. Смирнов, В.А. Тютяев.
30. А.с. 736441 (СССР). Устройство для нанесения покрытий. Ю.А. Харламов.
3. Formirovanie gazotermicheskikh pokrytij pri proizvodstve detalej. S.A. Klimenko, L.G. Polonskij, M.Ju. Harlamov, Ju.A. Harlamov, P.A. Vitjaz', V.S. Ivashko, M.L. Hejfec, S.A. Chizhik; pod obshh. red. Ju.A. Harlamova i M.L. Hejfec; Nac. Akad. nauk Belarusi, Otd. Fiz.-tehn. Nauk, Nac. akad. nauk Ukrainy, In-t sverhtverdyh materialov im. V.N. Bakulja. Minsk: Belaruskaja navuka, 2020. 416 s.
4. Bazhenova T.V., Golub V.V. Yspol'zovanye gazovoj detonacyy v upravljajemom chastotnom rezhyme. *Fyzyka gorenija y vzryva*. 2003. T. 39, № 4. S. 3 – 21.
5. Shorshorov M.H., Harlamov Ju.A. Fyzyko-hymicheskiye osnovy detonacyonno-gazovogo napylenija pokrytij. – M.: Nauka, 1978. – 224 s.
6. Gazotermicheskiye pokrytija yz poroshkovyh materyalov: Spravochnyk / Ju.S. Borysov, Ju.A. Harlamov, S.L. Sydorenko, E.N. Ardatovskaja. Kyev: Naukova dumka, 1987. 544 s.
7. Shesternikov V.Y. Detonacyonnoe nanesenye pokrytij. *Poroshkovaja metallurgija*, 1968, № 1. S. 37 – 46.
8. A.s. 629682 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonno napylenija pokrytij. Ju.A. Harlamov, Ju.Y. Pysklov, N.M. Rybalka, O.Y. Malyshev.
9. Shhelokov Ja.M., Telegyn E.M., Podymov V.N. Posobyje po osvoeniju system relaksacyonnoho vybracyonnoho gorenija. Kazan': Yzd-vo KGU, 1971. 80 s.
10. Moyn F.V., Shevchuk V.U. Javlenye zabrosa plameni pry gorenny predvartel'no peremeshannyh gazov v protochnoj systeme – FGV, 1968, № 2. S. 209 – 214.
11. Levyn A.M., Brjuhanov O.N. Vlyjanye temperatury stenok ogneвого kanala na uslovija vozniknovenija proskoka plameni. *Gazovaja promyshlennost'*, 1963, № 10.
12. Bartenev S.S., Fed'ko Ju.P., Grygorov A.Y. Detonacyonnye pokrytija v mashynostroenyy. L.: Mashynostroenye, 1982. 215 s.
13. Fed'ko Ju.P. Yssledovanye processa nanesenija y svojstv okysnyh detonacyonnyh pokrytij. Avtoref. dysser. kand. tehn. nauk. M.: 1980. 20 s.
14. Fed'ko Ju.P., Bartenev S.S., Nedel'ko V.E. Fyzycheskiye osnovy konstruyrovanyja besklapannyh dozatorov detonyrujushhej smesy gazov. *Detonacyonnye pokrytija*. Kalynyn, 1980. s. 54 – 63.
15. A.s. 508994 (USSR). Ustanovka dlja nanesenija poroshkovyh materyalov detonacyonnym metodom. Ju.P. Fed'ko.
16. A.s. 539400 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonno nanesenija pokrytij. Ju.A. Harlamov.
17. A.s. 769853 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonno napylenija pokrytij. Ju.A. Harlamov.
18. A.s. 980318 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonno napylenija pokrytij. Ju.Y. Pysklov, Ju.A. Harlamov.
19. Detonacyonno-gazovaja apparatura dlja napylenija pokrytij / Ju.A. Harlamov, M.H. Shorshorov, Ju.Y. Pysklov, B.L. Rjaboshapko. M.: YMET AN USSR, 1980. 65 s.
20. Harlamov Ju.A., Pysklov Ju.Y., Rjaboshapko B.L. Optymizacija konstrukcyj detonacyonno-gazovoj ustanovky dlja nanesenija pokrytij. *Zashhytnye pokrytija na metallah*, vyp. 16. Kyev: Naukova dumka, 1982, s. 62 – 64.
21. A.s. 705734 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonno nanesenija poroshkovyh materyalov Tver'-2. L.T. Gordeeva, A.M. Zynger, V.Y. Smyrnov y dr.
22. A.s. 690688 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonno nanesenija poroshkovyh materyalov Tver'-3. L.T. Gordeeva. A.M. Zynger, V.Y. Smyrnov y dr.

References

1. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective / G.D. Roy, S.M. Frolov, A.A. Borisov, D.W. Netzer. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30 (2004) pp. 545 – 672.
2. Innovacijni mozhyvosti gazovoi' detonacii' / Harlamov Ju.O., Polons'kyj L.G., Balyc'ka N.O., Klymenko S.A. *Nauka ta innovacii'*, 2020, t. 16, № 6. S. 105 – 112.

23. A.s. 736442 (USSR). Ustanovka dlja detonacyonnogo nanesenija pokrytyj. Ju.A. Harlamov.
24. A.s. 736440 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonnogo napylenija pokrytyj. Ju.A. Harlamov.
25. A.s. 752894 (USSR). Detonacyonnaja ustanovka dlja napylenija pokrytyj. Ju.A. Harlamov.
26. Puty povyshenija tochnosti avtomaticheskogo dozirovaniya komponentov detonacyonno-gazovoj smesy. A.M. Zynger, L.T. Gordeeva, V.Y. Smyrnov y dr. Detonacyonnye pokrytyja. Kalynyn, 1980, s. 42 – 53.
27. A.s. 656252 (USSR). Ustanovka Tver'-1 dlja detonacyonnogo nanesenija poroshkovyh materiyalov. A.M. Zynger, L.T. Gordeeva, V.Y. Smyrnov, V.A. Tjutjaev.
28. A.s. 720859 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonnogo nanesenija poroshkovyh materiyalov. L.T. Gordeeva, A.M. Zynger, V.Y. Smyrnov y dr.
29. A.s. 666712 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonnogo nanesenija poroshkovyh materiyalov. L.T. Gordeeva, A.M. Zynger, V.Y. Smyrnov, V.A. Tjutjaev.
30. A.s. 736441 (USSR). Ustrojstvo dlja nanesenija pokrytyj. Ju.A. Harlamov

Kharlamov Y., Mitsyk A., Romanchenko O. Gas exchange in D-gun's devices for coating spraying

The main requirements for detonation gas installations (DGI) for coating deposition are explosion safety and environmental friendliness, stable operation and high productivity, etc. In the technological application of gas detonation, it is necessary to solve the problems of fast and high-quality mixing of mixture components, reliable initiation of detonation, cooling of installations, taking into account the limits detonation, strength and weight of devices, etc. The stages of the DGI operating cycle, including the processes of gas exchange in the detonation combustion chambers, ensuring their filling with a fresh combustible mixture and powder with the previous displacement of residual combustion products, determine the initial state of the fresh charge, which affects the intensity and the nature of the physicochemical transformations occurring in the powder particles, and thus the conditions for the formation of coatings. This article is devoted to the systematization and analysis of the principles of organizing gas exchange in the working combustion chambers of detonation-gas installations for spraying coatings, including the analysis and systematization of the designs of detonation-gas installations for spraying coatings operating with various structures of the working cycle, with the identification of concepts and patterns of gas exchange in working combustion chambers. The main gas exchange schemes include the following: with the ejection of residual combustion products by a purge gas or a combustible mixture component; with the ejection of residual combustion products with a fresh combustible mixture; with pumping out of residual products of combustion; combined gas exchange with pumping and purge of residual combustion products; with transverse movement of gases; with a variable composition of the fresh combustible mixture. According to the method of removing residual gases, one should distinguish between: blowing the barrel with inert gases and subsequent supply (pushing out the inert gas) with a fresh combustible mixture of gases; blowing the barrel with air or oxygen, followed by the supply of a fresh combustible mixture; supply of a fresh combustible mixture with its direct ejection of combustion products; supply of a fresh combustible mixture with its direct ejection of combustion products through an intermediate gas plug of short length; pumping out residual gases from the barrel to create a rarefaction (vacuum) with subsequent filling with a fresh combustible mixture of gases; combination of purging (pushing out) of residual gases with pumping out. In the direction of the flow of a fresh combustible mixture, its supply is distinguished: in the direction of the outflow of combustion products; towards the direction of the outflow of combustion products; across the direction of the outflow of combustion products; a combination of the above methods. According to the place where the fresh combustible mixture is introduced into the barrel, its supply is distinguished: at the closed end; at the open end; in the middle part of the barrel; simultaneously along the entire length of the barrel; a combination of the above methods. Gas exchange schemes with different gas supply cycles are considered.

tion products with a fresh combustible mixture; with pumping out of residual products of combustion; combined gas exchange with pumping and purge of residual combustion products; with transverse movement of gases; with a variable composition of the fresh combustible mixture. According to the method of removing residual gases, one should distinguish between: blowing the barrel with inert gases and subsequent supply (pushing out the inert gas) with a fresh combustible mixture of gases; blowing the barrel with air or oxygen, followed by the supply of a fresh combustible mixture; supply of a fresh combustible mixture with its direct ejection of combustion products; supply of a fresh combustible mixture with its direct ejection of combustion products through an intermediate gas plug of short length; pumping out residual gases from the barrel to create a rarefaction (vacuum) with subsequent filling with a fresh combustible mixture of gases; combination of purging (pushing out) of residual gases with pumping out. In the direction of the flow of a fresh combustible mixture, its supply is distinguished: in the direction of the outflow of combustion products; towards the direction of the outflow of combustion products; across the direction of the outflow of combustion products; a combination of the above methods. According to the place where the fresh combustible mixture is introduced into the barrel, its supply is distinguished: at the closed end; at the open end; in the middle part of the barrel; simultaneously along the entire length of the barrel; a combination of the above methods. Gas exchange schemes with different gas supply cycles are considered.

Key words: gas exchange; combustible mixture; detonation gas spraying (D-Gun spraying); residual products of combustion; coatings; purge gas; mixing gases.

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк)
yuriy.kharlamov@gmail.com

Міцник Андрій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) an.mitsyk@gmail.com

Романченко Олексій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк)
alexvromanchenko@gmail.com

Стаття подана 27.01.2022 р.