

пластинам (2) определённой кривизны.

2. Воздействие колебаний на технологическую среду с целью приведения её в активное состояние, обеспечивающее обработку.

Вибрационное воздействие на объекты (детали), подвергаемые обработке, сопровождается изменением их физического состояния и превращениями, особенности которых определяются параметрами колебаний.

Под воздействием вибраций в обрабатываемом материале распространяются волны деформаций. При воздействии деформаций на многослойные среды слой, прилегающий к вибрирующему рабочему органу (обрабатываемому инструменту), получает от него силовые импульсы, которые передаются следующим частицам и слоям. Вследствие инерционности, наличия сил трения и необратимых (остаточных) деформаций (например, пластическая деформация материала деталей) импульсы по мере передачи их от слоя к слою (по мере удаления от вибрирующего органа) постепенно ослабевают. Степень затухания определяется свойствами материала, а также характером и величиной силовых импульсов. Энергия колебательного движения источника вибраций в процессе прохождения волны затрачивается на ускорение обрабатываемой детали и на восполнение потерь при необратимых деформациях.

#### **4. Выводы**

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы.

1. Приведена классификация механических колебаний и их влияние на технологический процесс обработки материала деталей.

2. Дается характеристика колебательных процессов и рассмотрен их механизм, обеспечивающий деформацию обрабатываемого материала.

**Список литературы:** 1. *Бабичев А.П.* Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / *А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко и др.* – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. – 191 с. 2. *Бабичев А.П.* Основы вибрационной технологии / *А.П. Бабичев.* – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ. 4.2, 1994. – 89 с.

*Поступила в редколлегию 11.06.2012*

**УДК 621.3.078, 621.45.034, 621.45.018.2**

**С. КОСТЕЛОВ**, асп., асис., Луцкий національний технічний університет,  
**І. КОНОВАЛЕНКО**, канд. техн. наук, доц., Тернопільський національний  
технічний університет ім. І.Пулля

### **ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ РЕМОНТУ І ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ КОЛЕКТОРА ОСНОВНОГО ПАЛИВНОГО ВУЗЛА ГТД**

У роботі досліджено проблему випробування паливних колекторів основного паливного вузла газотурбінного двигуна на базі засобів та методів, які застосовуються на авіаремонтних підприємствах. Проаналізовано фактори впливу та математичні методи аналізу і показано, що одним із оптимальних варіантів рішення задачі автоматизації є впровадження математичного та імітаційного моделювання. Це дозволить вести електронний облік даних випробувань та вимірювань, в автоматичному режимі проводити розрахунки та передбачувати поведінку системи в заданих режимах. В процесі аналізу було визначено основний напрямок побудови

моделі та встановлено основні фактори, які впливають на процес. За результатами проведеної роботи складено методологію подальшого дослідження.

**Ключові слова:** автоматизація, двосоплова двоконтурна форсунка, паливний колектор, математична модель, факел розпилю.

В работе исследована проблема испытания топливных коллекторов основного топливного узла газотурбинного двигателя на базе средств и методов, которые применяются на авиаремонтных предприятиях. Проанализированы факторы влияния и математические методы анализа и показано, что одним из оптимальных вариантов решения задачи автоматизации является внедрение математического и имитационного моделирования. Это позволит вести электронный учет данных испытаний и измерений, в автоматическом режиме производить расчеты и предвидеть поведение системы в заданных режимах. В процессе анализа было определено основное направление построения модели и установлены основные факторы, влияющие на процесс. По результатам проведенной работы составлено методологию дальнейшего исследования.

**Ключевые слова:** автоматизация, двухсопловая двухконтурная форсунка, топливный коллектор, математическая модель, факел распила.

The problem on research and test of research and testing of the basic fuel manifold GTE on the basis means and methods which are applied at the aircraft repair enterprises is considered. Analyzed the impacts and mathematical methods of analysis and show that one of the best options for solving the problem of automation is to introduce mathematical and simulation modeling. This will keep electronic records of test data and measurements automatically perform calculations and predictability of behavior in the desired mode. During the analysis it was determined the main direction of constructing a model and set the main factors affecting the process. At this stage of the study, the results of the work methodology prepared for further study.

**Keywords:** automation, dual circuit nozzle atomizers, fuel manifold, a mathematical model, torch atomization.

Авіаційний газотурбінний двигун (ГТД) – найскладніший у проектуванні, виготовленні, збірці і обслуговуванні елемент літального апарату. На сьогоднішній день стає неможливим проектування і виготовлення конкурентоспроможної наукомісткої продукції без застосування сучасних технологій та методів, у тому числі і математичного моделювання. Теж саме можна сказати про ремонт та випробування агрегатів, що вимагає великих витрат енергоресурсів та часу.

Математичні моделі застосовують як на стадії розробки, проектування та доведення, так і на пізніших стадіях життєвого циклу – на стадії експлуатації, у тому числі післяремонтних випробуваннях. Моделювання окремих вузлів і авіаційних газотурбінних двигунів у цілому дає багато корисної інформації без витрат на виробництво окремих елементів, випробувальні стенди і самі випробування. На жаль, ціною відмови від додаткових витрат стає точність моделювання та передбачення поведінки об'єкта дослідження по поведінці математичної моделі.

У даній роботі проводиться опис та аналіз можливостей застосування математичного моделювання для автоматизації ремонтних робіт і випробувань паливного колектора основного паливного вузла ГТД.

## **I. Опис проблеми**

На більшості сучасних ГТД в основних камерах згоряння використовують багатофорсункові схеми подачі палива із застосуванням двухконтурних

двосоплових відцентрових форсунок. Це дозволяє значною мірою розширити діапазон роботи камери згоряння при запуску ГТД, на дросельних режимах і у висотних умовах за рахунок підвищення тиску впорскування на малих витратах.

Перед розглядом проблематики ремонту колектора основного паливного вузла проаналізуємо механізм багатофорсункової системи подачі палива та режими її роботи.

При роботі на режимах з малими витратами палива клапан закритий і паливо в двигун впорскується через (додатковий) контур I колектора, канал якого з'єднаний із центральним каналом форсунки (рис. 1). Зі збільшенням режиму роботи двигуна тиск перед клапаном зростає і при певній величині відкривається II контур колектора (основний) внаслідок подолання затягування пружини розподіленим навантаженням від тиску палива. Канали двох контурів мають різні прохідні перерізи. Прохідні перерізи першого контуру менші ніж другого; малі перерізи забезпечують високий тиск впорскування і хорошу якість розпилу палива на малих витратах. Прохідні перерізи другого контуру більші, вони дозволяють пропустити через форсунку велику кількість палива без надмірного підвищення тиску впорскування [9].

Спільна витратна характеристика двосоплової форсунки із розподільником потоку представлена на рис. 2. Ділянка АВ характеристики відповідає подачі палива через перший контур форсунки, ВС – режиму відкриття золотника клапану розподільника і CD – подачі палива через обидва канали форсунки. Дійсну витрату форсунки відображає крива ABCD. Протяжність ділянки ВС, який відповідає різним прохідним січенням другого контуру розподільника зі збільшенням у міру зростання тиску палива  $p_{\phi}$ , визначається заданим законом зміни площі перерізу при переміщенні золотника. Сумарна витратна характеристика з усіма форсунками камери згоряння визначається кількістю головок жарових труб, в яких встановлюють форсунки. Індивідуальна витрата палива через кожен форсунку визначається положенням кожної камери і висотою гідростатичного стовпа рівня палива в основному (або додатковому) колекторі (при горизонтальному розташуванні камери згоряння).

У статтях із відкритим доступом описано проблеми, що виникають при застосуванні на ГТД двоконтурних двухсоплових форсунок, проте детального дослідження впливу недоліків подібної конструктивної схеми на ефективність робочого процесу ГТД не наводиться. Зокрема, в монографії А. Лефевра [1] подано наступне: «у двосопловій форсунці забезпечується висока якість розпилювання палива при низьких витратах завдяки більшому перепаду тисків у вузьких тангенціальних каналах внутрішньої форсунки. В момент відкриття клапана основного контуру форсунки якість розпилювання палива погіршується внаслідок невисокого тиску подачі палива, а потім із зростанням витрат розпилювання поліпшується. Для підвищення якості розпилювання палива відразу після відкриття клапана зазвичай збільшують кут розкриття конуса розпилу додаткового контуру форсунки до значення, що трохи перевищує кут конусу основного контуру форсунки, для того щоб вони, зливаючись на малій відстані від форсунки, обмінювались енергією. При цьому розпилювання палива дещо погіршується.

Досліджено вплив сили тяжіння на розподіл палива в багатофорсункових системах, які використовуються в більшості ГТД. Незадовільний розподіл палива відбувається при низькому тиску подачі, коли гідростатичний тиск стає істотним для нижніх форсунок. Збільшення тиску відкриття клапана трохи поліпшує розподіл палива по колектору». Під час ремонту двигунів паливний колектор демонтується з двигуна, розбирається, проходить відновлення з подальшою перевіркою та налагодженням, відповідно до технології ремонту.

Перевірку та налагодження паливного колектора виконують в декілька етапів, один з яких включає виведення витратних характеристик нових, або відновлених форсунок паливного колектора, до технологічно заданого рівня. Після поступлення на ремонт, паливний колектор, після очистки та відновлення перевіряється на сумарні значення витрати по всіх контурах. Після цього форсунки, витратні характеристики яких не відповідають технічним умовам (ТУ), демонтують з колектора для відновлення або заміни. На етапі налагодження окремих паливних форсунок, виконується перевірка витрати по 12-ти секторах конуса розпилу та тангенціальний кут факела розпилу відповідно до технічного регламенту.

Нерівномірність розподілу палива по 12-ти секторах конуса розпилу обраховується за наступною формулою:

$$\delta\% = \frac{(Q_{\max} - Q_{\min})}{Q_{\max}} \cdot 100\%,$$

де  $Q_{\max}$  – максимальне значення витрати на одному із секторів;  $Q_{\min}$  – мінімальне значення витрати на одному із секторів.

Значення допустимої нерівномірності повинно бути:  $\delta_{\text{дон}}\% \leq 50\%$ . Замір нерівномірності проводиться при наявності палива у зливних трубках 12-ти секторної камери, через 2 хвилини роботи на заданому режимі.

Перевірка кута розпилу та зміщення осі факелу розпилу від осі форсунки, виконується наступним чином:

Кут розпилу має бути:

–80-90° – форсунки №9,17;

–75-90° – інші форсунки.

Відхилення осі конуса розпилу від осі форсунки:

–4° – для форсунок №9,17;

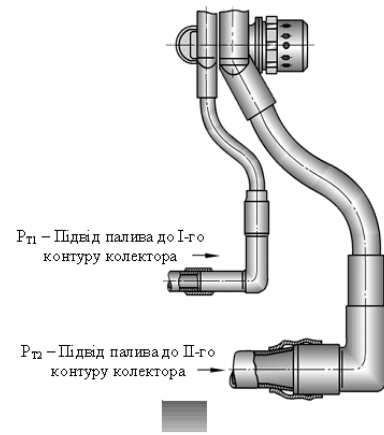


Рис. 1. Схема подачі палива до двухступеневої двосоплової форсунки з розподільником контурів

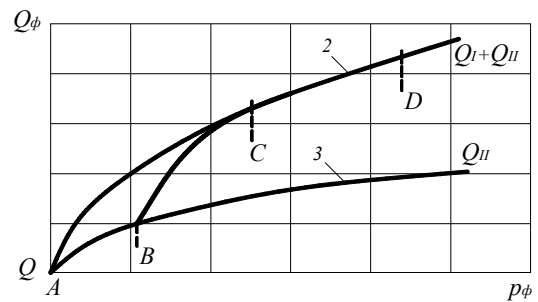


Рис. 2. Спільна витратна характеристика двосоплової форсунки із розподільником

–2° – для остальных форсунок.

Відхилення від осі факелу конуса розпилу від осі форсунки визначається як половина різниці між правим  $a$  та лівим  $b$  кутами.

Загальна витрата через форсунку визначається за наступною формулою:

$$Q_1 = \frac{Q_2 \cdot 3600}{T \cdot 1000},$$

Де  $Q_1$  – витрата через форсунку кг/час;  $Q_2$  – заміряна витрата через форсунку в грамах;  $T$  – час заміру витрати через форсунку в сек.

Далі виконують монтаж заміненних форсунок із подальшою перевіркою загальної (сумарної) витратної характеристики колектора. При цьому виникають похибки ремонту і випробувань, від яких значною мірою ускладнюється процес налагодження системи. Головна проблема заключається в тому, що від заводу-виробника поступають комплекти деталей, які не мають чіткої номенклатури. Така ситуація обумовлюється тим, що всі деталі виготовляються із значними допусками для можливостей доопрацювання, в залежності від умов зношення старих деталей [9]. Один комплект включає 10, деталей які мають допуск по верхній межі, і 10 деталей із допуском по нижній межі. Таким чином, при заміщенні бракованої деталі новою, чітке її налаштування практично неможливе і все залежить від досвіду майстра, який виконує роботу. І якщо форсунка виведена до нормованого значення ТУ, існує велика вірогідність того, що вона при встановленні на колектор дасть нові похибки, або виведе із ТУ інші форсунки [3]. В такому випадку форсунки знову знімають і доопрацьовують відповідно до технічного регламенту проведення ремонтних робіт. Можна сказати, що фактично якість ремонту і налагодження, а також час, який затрачається на весь процес, залежить від особистого досвіду майстра, який проводить всі операції. Крім того, випробування колектора в зборі проводиться у горизонтальному положенні, коли експлуатація його проходить у вертикальному розміщенні, що дає певний вплив, про який було описано вище.

Згадані проблеми та відсутність досліджень з даної тематики у відкритих джерелах вказують на актуальність проведення математичного аналізу впливу умов, методів ремонту та налагодження роботи паливного колектора із врахуванням двоконтурності паливного колектора на ефективність силової установки в особливих точках його підключення.

Таким чином, задля покращення та пришвидшення ремонтних робіт слід врахувати напрацьовану статистику відмов та результатів налаштувань, а також їх впливів на загальну систему. Побудова математичної моделі відповідно до законів максимальної вірогідності та розподілення випадкових величин дасть можливість передбачити параметри налаштування заміщеної форсунки. А застосування нечіткої логіки дозволить врахувати припущення та передбачення майстра з його особистого досвіду.

## **II. Аналіз основних параметрів та впливів**

Поліпшення якості проведення ремонту та випробування колектора основного паливного вузла ГТД можливе із введенням автоматизації процесу за рахунок побудови математичних моделей та врахуванням похибок. Із впровадженням математичного моделювання у процес ремонту постає

можливість використання методів аналізу та синтезу, які застосовуються для розробки та проектування.

Отже, в першу чергу постає задача побудови моделі, яка б описувала робочий процес ГТД з врахуванням нерівномірного розподілу палива по паливному колектору. Необхідно побудувати модель таким чином, щоб було можливо врахувати зміни сумарного значення витрати залежно від результатів проведення їх індивідуальних випробувань за витратою по секторах. Також слід врахувати щільність розпилу і ввести уточнюючі коефіцієнти та врахувати статистичні дані напрацьовані за останні роки.

При побудові частини математичної моделі для розпилу палива через форсунки слід визначити, як правильно враховувати фази розпилювання, і як буде змінюватись дисперсність розпилюваних частинок. Щоб встановити, чи варто перевантажувати загальну модель даними значеннями, проаналізуємо гідродинаміку газорідного факелу розпиленої рідини.

Аналіз можливості побудови даної частини моделі був оснований на закономірності гідродинаміки дисперсних середовищ за допомогою двох математичних підходів – статистичного і феноменологічного.

Перший полягає в дослідженні фізичних явищ на основі молекулярної будови речовини. Перехід до макроскопічного опису властивостей і процесів проводять за допомогою функцій розподілу. Їх введення дозволяє представити властивості індивідуальних молекул (масу, кількість руху, енергію і т. д.) безперервно змінними по всьому простору, заповненому дискретним середовищем. Таким чином, цей підхід пов'язаний з введенням додаткових гіпотез про властивості мікрочастинок і їх взаємодії.

Другий заснований на уявленні про безперервність руху речовини і на отриманих дослідним шляхом певних закономірностях. Основою даного методу є гіпотеза суцільності (континуальності) кожної з фаз системи і середовища в цілому та використання для їх вивчення понять і методів механіки суцільного середовища. Сучасний феноменологічний підхід детально розроблений Х. А. Рахматуліним [4] і розвинений в роботах А. Н. Крайка, Р. І. Нігматуліна та інших авторів [2, 5]. Проаналізувавши дані роботи, можна зробити висновок, що факел розпорошеної рідини слід розглядати як відкриту для зовнішніх впливів систему рухомих і взаємодіючих крапель (утворених обома контурами форсунки) і суцільного середовища. Таким чином, в кожній точці простору рух як суцільної, так і дисперсної фаз залежить від внутрішніх (міжфазова взаємодія) і зовнішніх причин (взаємодія факела і зовнішнього середовища). Отриманню рівнянь, що описують процеси в багатофазних системах (дисперсне середовище іноді зручно розглядати як сукупність декількох фаз), присвячено багато робіт (наприклад, [2]). Однак для практики потрібні тільки деякі середні сумарні (інтегральні) величини, оскільки простежити за процесами, що відбуваються з кожною окремою краплею, практично неможливо.

Тому врахування фактора зміни дисперсності часток і як наслідок – зміни щільності розпилу в процесі змішування потоків може призвести до значного перевантаження моделі. Наслідком цього можуть бути значні розрахункові похибки при обробці даних моделі. Таким чином, варто включити у загальну

модель лише фактори зміни щільності розпилу, без врахування властивостей зміни дисперсності частинок.

Перш ніж перейти до аналізу моделювання процесів, що протікають при розпиленні, необхідно, по-перше, разом з силами, зумовленими статичним тиском, гравітацією і опором, оцінити вплив інших факторів; по-друге, вибрати рівняння для розрахунку коефіцієнта опору.

Спочатку проаналізуємо сили впливу. Оцінюючи сили, що описують ефект приєднаної маси, можна описати динамічний напір середовища відповідно до частки. Такий вплив проявляється лише на ділянці різкого гальмування крапель, тобто у корені факелу розпилу, де газ практично відсутній [6]. Таким чином, можна зробити висновок, що в нашому випадку цими силами при побудові математичної моделі можна знехтувати. Оцінюючи сили Бассе-Буссінеска, які враховують відхилення течії від усталеного значення і виражають миттєвий гідродинамічний опір, можна зробити висновок, що її можна брати до уваги лише в тому випадку, коли густина суцільної фази того ж порядку, що і густина дисперсних часток більша [7]. Тому для нашої задачі дані сили також можна не враховувати. Розглянувши вторинне подрібнення крапель у факелі розпилу та сили Бернуллі, що зумовлюються миттєвими різницями швидкостей, можна зробити висновок, що дані параметри також є несуттєвими, так як вони пов'язані із турбулентними пульсаціями. Пульсації потоку є фактично відсутніми, оскільки тиск подачі палива до колектора є постійним [6]. Отже, дослідивши основні сили впливу на потік, можна зробити висновок, що для нашої задачі немає необхідності складати рівняння для врахування коефіцієнтів опору.

Проаналізуємо вплив накладання факелів розпилу. При паралельній роботі кількох форсунок факели розпилу перетинаються. При цьому можлива зміна дисперсного складу крапель внаслідок їх зіткнень, зміна концентрації частинок і зменшення площі сукупного факела порівняно з сумою площ окремих факелів на тому ж рівні. Відмітимо деяку особливість цього фактора. Вже при порівняно невеликій відстані розпилювачів один від одного факели стають взаємно прозорими, і ймовірність зіткнення окремих частинок близька до нуля. При віддаленні від форсунки прозорість факелів швидко зростає, і ще задовго до їх перетину практично дорівнює одиниці. Тому при накладенні факелів коефіцієнт прозорості змінюється тільки в третій-четвертій значущій цифрі, і не може помітно вплинути на гідродинаміку.

Таким чином, паралельну роботу кількох форсунок слід враховувати в рівняннях зон вільного протікання:

рівняння балансу площ факелів  $f_\phi$  та периферичного потоку  $f_n$ :

$$f = f_\phi + f_n, \quad (1)$$

та рівняння зміни січення факелу:

$$\frac{df_\phi}{dz} = 2\sqrt{\pi \cdot f_\phi} \cdot \frac{\omega_{жф}}{\omega_{жз}}. \quad (2)$$

Вважається, що до перетину кожен факел працює незалежно і обмежений площею  $f_\phi$ . Після точки перетину на кожному кроці інтегрування з площі  $f_\phi$ , розрахованої за рівнянням (2), віднімається площа відповідного сегмента або

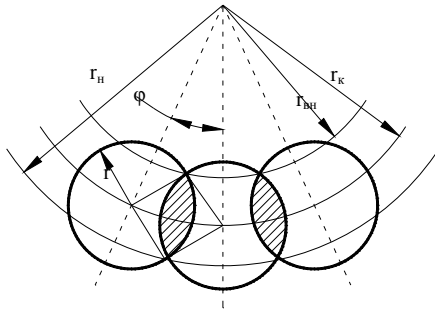


Рис. 3. Схема розміщення форсунок для утворення спільного факелу розпилу

Описаний прийом дещо умовний, проте дозволяє значно наблизитися до реальних умов процесу, так як площа основи конуса факелу розпилу буде змінюватись при досягненні периферійними факелами стінки жарової труби, але загальна витрата палива залишатиметься незмінною. Таким чином, оскільки ми маємо роботу із жорстко регламентованою технологією, безпосередньо по витратним характеристикам, описані вище параметри не мають значного впливу на модель і ними можна знехтувати.

### III. Можливість математичного опису робочого процесу

У роботі [8], проф. д.т.н. Ахмедзяновим Д.А. було проведено дослідження впливу нерівномірного розподілу палива по колектору в процесі заповнення основного паливного колектора з послідовним підключення окремих форсунок на основні параметрів камери згоряння, що характеризують ефективність її роботи. Ним було виявлено значне падіння середньомасової повноти згоряння палива в діапазоні витрат, що відповідають області підключення основного контуру двоконтурної форсунки. Встановлена ним залежність і проведені експериментальні дослідження показали, що даний факт потребує подальшого дослідження проблем, що виникають в процесі заповнення основного паливного колектора в складі ГТД. Не зважаючи на те, що робота [8] спрямована на розробку нового типу системи подачі та розподілення палива по основному колектору ГТД, описані експериментальні дані цієї роботи можна використати для вирішення нашої задачі.

Проаналізувавши результати роботи [8], а також описані вище фактори впливу, для дослідження можна прийняти наступну модель: камера згоряння (КЗ) трубчато-кільцевої схеми в ролі середовища роботи системи, колектор основного паливного вузла ГТД із двоконтурними двосопловими форсунками, витратні характеристики яких визначаються на технологічному стенді У-2631-87.

Оскільки на ремонтних експериментальних стендах витратні характеристики визначаються за рівнями у мірних колбах, а розрахунково за масою, то при побудові моделі необхідно врахувати дану залежність.

Масова витрата палива через форсунку визначається за формулою:

$$G = f \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot p}, \quad (3)$$

де  $f$  – площа перерізу форсунки;  $\rho$  – густина палива;  $p$  – перепад тиску палива у форсунці;  $\mu$  – коефіцієнт витрати форсунки.

сегментів (рис. 3, сегменти заштриховані), і у рівняння балансу площ (1) підставляється вже нова площа  $f_{\phi}$ .

У площу вноситься також поправка при досягненні периферійними факелами стінки жарової труби. Для включення даної поправки, запишемо рівняння для врахування форми жарової труби  $\frac{df}{dz} = \varphi(z)$



З врахуванням двоконтурності форсунки, площа перерізу контурів форсунки буде розраховуватись так:

$$f_1 = \frac{Q_1 \cdot \sqrt{\rho}}{3600 \cdot 1000 \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p_1}},$$

$$f_2 = \frac{Q_2 \cdot \sqrt{\rho}}{3600 \cdot 1000 \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p_2}},$$
(4)

де  $Q_i$  – витрата палива по рівню, яка визначається в результаті експерименту (випробування).

Виходячи з формул (3) і (4), залежності масової витрати палива через додатковий контур ( $G_1$ ) і основний контур ( $G_2$ ) від перепаду тиску можуть бути представлені в наступному вигляді:

$$G_{1i} = f_1 \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot p_{1i} \cdot 101325}$$

$$G_{2i} = f_2 \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta h_i \cdot 101325},$$
(5)

де  $p_{1i} = \Delta h_i + 12$  (атм.),  $p_{1i}$  – перепад тиску палива на форсунці додаткового контуру; і  $\Delta h_i$  – перепад тиску палива на форсунках основного контуру.

Сумарна масова витрата палива через форсунку визначається так:

$$G_{\phi i} = G_{1i} + G_{2i}$$
(6)

де  $G_{1i}$  – масова витрата через додатковий контур  $i$ -ї форсунки;  $G_{2i}$  – масова витрата палива через основний контур  $i$ -ї форсунки.

Тоді сумарна масова витрата палива у паливному колекторі буде розраховуватись:

$$G_{\Sigma} = \sum G_{1i} + \sum G_{2i}$$
(7)

Значення  $G_{\Sigma}$  приходить по паливному потоку з регулятора подачі палива. Далі в елементі вирішується рівняння виду (7) методом Ньютона і визначаються значення перепадів тиску на соплах обох контурів форсунок. За значеннями перепадів тиску розраховуються витрати палива, які проходять через контури форсунок. У свою чергу, визначення сумарної витрати буде залежати від якості експериментального визначення індивідуальних витрат кожної з форсунок, врахування площ перерізів контурів та похибок, які виникають при монтажі елементів.

Отже, відповідно до наведеного опису та аналізу, складемо методологію побудови загальної моделі системи, яка відобразатиме процес ремонту паливного колектора, з врахуванням особливостей ремонтних та налагоджувальних робіт. В першу чергу потрібно виконати збір даних по ремонту та виконаним роботам до єдиної електронної бази. Після цього необхідно проаналізувати статистичні дані та побудувати модель відповідно до законів максимальної вірогідності та розподілення випадкових величин. Далі за отриманими результатами зробити експертну оцінку. По оцінках експертів із застосуванням нечіткої логіки побудувати модель передбачення можливих похибок та можливостей налагодження форсунок, які замінюються. І по даних попередніх випробувань побудувати загальну математичну та імітаційну модель нерівномірності розподілу палива по паливному колектору із врахуванням всіх уточнюючих коефіцієнтів по передніх моделях. Таким чином запропонована

методологія повинна покращити загальну методику дослідження та зменшити затрати часу на ремонт та випробування.

### **Висновок**

Проаналізовано методику математичного моделювання робочого процесу колектора основного паливного вузла та фактори, які впливають на сумарні витрати пального. Встановлено вагомі та незначущі фактори робочого процесу, які впливатимуть на побудову моделі.

Наявність математичної та імітаційної моделей при застосуванні відповідного програмного забезпечення та баз даних дадуть можливість створити електронну базу результатів випробувань та вимірювань. Це дозволить в автоматизованому режимі проводити розрахунки та передбачувати поведінку системи в заданих режимах. Введення автоматичного аналізу, проведення розрахунків, а також побудова та аналіз моделей повинно не лише підвищити якість процесу, але і значно зменшити час виконання ремонту за рахунок меншої кількості експериментів, що в свою чергу призведе до зменшення затрат на енергоресурси.

В процесі аналізу вже описаних залежностей та параметрів було визначено основний напрямок побудови моделі та встановлено основні фактори, які впливають на процес. На даному етапі дослідження, за результатами проведеної роботи складено методологію подальшого дослідження.

**Список літератури:** 1. *Лефевр А.* Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Мир, 1986. – 566 с. 2. *Крайко А.Н.* и др. Механика многофазных сред. Итоги науки и техники. Гидродинамика. М.: Наука, 1972. – т. 6., 174 с. 3. *Раушенбах Б. В.* и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1964. – 526 с. 4. *Шилов Г. Е.* Математический анализ функции нескольких вещественных переменных. М.: Наука, 1972. – 624 с. 5. *Верещагин И. П.* и др. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М.: Энергия, 1974. – 346 с. 6. *Бородин В. А.* и др. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение 1967. – 208с. 7. Исследование изменения параметров работы камеры сгорания, в процессе заполнения основного контура двухконтурной форсунки / Д. А. Ахмедзянов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2008. – Т. 11, № 2(28). 12-20 с. 8. *В.М. Акимов, В.И. Бакулев и др.* Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей / Под ред. С.М. Шляхтенко. Учебник для вузов – 2-е издание, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. – 568 с. 9. *Федоров Ю.Н.* Справочник инженера по АСУ ТП: Проектирование и разработка (учебно-практическое пособие для инженеров) / Ю.Н. Федоров. – М.: Инфра-Инженерия, 2008. – 928 с.

*Поступила в редколлегию 05.06.2012*

**УДК 629.4.027**

**Є.А. АСТАХОВ**, докт. техн. наук, провідний науковий співробітник, Інститут електрозварювання ім. Е.О. Патона НАН України, Київ,

**В. В. АРТЕМЧУК**, канд. техн. наук, доц., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. В. Лазаряна

### **НАНЕСЕННЯ ШАРУВАТИХ АМОРФІЗОВАНИХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ**

У статті розглянуті питання формування аморфізованих шарів покриттів в умовах газотермічного напилення. Позначено дві групи чинників, що впливають на утворення