

УДК 66.071.4: 66.084.2

doi: 10.32620/aktf.2020.4.08

С. І. ПЛАНКОВСЬКИЙ, О. В. ШИПУЛЬ, С. О. ЗАКЛІНСЬКИЙ

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна***ЗАСТОСУВАННЯ СОПЕЛ НАДКРИТИЧНОГО ВИТІКАННЯ
ДЛЯ ШВИДКІСНОГО ВИМІРЮВАННЯ ОБ'ЄМУ ПОСУДИН**

Предметом дослідження є способи визначення об'єму посудин складної форми. *Метою* роботи є розробка та наукове обґрунтування швидкісного способу вимірювання в газовому середовищі об'єму внутрішньої порожнини посудини, що має складну геометричну форму, на основі надкритичного витікання. У якості *задачі дослідження* визначена розробка методики розрахування об'ємів елементів газового тракту раних запропонованого генератора газових сумішей на основі надкритичного витікання з проміжних ємностей постійного об'єму та підтвердження можливостей запропонованої методики за допомогою імітаційного моделювання процесу вимірювань об'єму за запропонованим способом. Отримано наступні *результати*. Запропоновано спосіб швидкісного вимірювання об'єму посудин складної форми, що заснований на заповненні вимірюваної посудини газом та його дренажні при надкритичному витіканні з сопла при динамічному вимірюванні тиску у посудині, за яким використовують сопло з попередньо визначеним коефіцієнтом витрати з використанням еталонної посудини. Обґрунтовано діапазон часу вимірювань для якого з одного боку виконуються умови угамування перехідних процесів у вимірюваних посудинах після початку надкритичного витікання технологічного газу, а з іншого – забезпечуються умови адиабатичного витікання. В ході імітаційного моделювання вимірювання об'єму посудини складної форми за запропонованим способом точність визначення об'єму посудини складала 0,0625% по відношенню до даних САД системи. Для використання запропонованого способу на практиці в склад засобів вимірювання слід включати еталонну посудину, а самі вимірювання проводити в два етапи, використовуючи в обох випадках для заповнення однаковий газ. При цьому на першому етапі за результатами контрольного вимірювання при витіканні з еталонної посудини уточнюється значення коефіцієнту витрати, а на другому при витіканні з вимірюваної посудини визначається шукана величина об'єму. Процес безпосереднього вимірювання об'єму при цьому буде тривати до 1 секунди, точність визначення об'єму можна очікувати на рівні 0,1 %.

Ключеві слова: вимірювання об'єму посудин; надкритичне витікання; числове моделювання.

Вступ

Газові суміші широко використовуються в різних технологічних процесах фізико технічної обробки. Так, змінюючи склад газового середовища можна в ефективно управляти технологічними характеристиками зварювальних процесів: продуктивністю, величиною втрат електродного металу на розбрикування, формою і механічними властивостями металу шва [1, 2]. Також відомо застосування газових сумішей різного складу в процесах лазерної обробки. При цьому якість газових сумішей безпосередньо впливає на якість технологічного процесу. Навіть невеликі відхилення в складі газової суміші можуть негативно вплинути на лазерний процес і привести до збоїв в роботі [3, 3]. Крім того, багатокомпонентні газові суміші різного складу широко застосовуються в плазмових процесах нанесення покриттів: фізичному, хімічному і асистованому плазмою хімічному осадженні [5, 6]. На ряду з цим задача генерації паливних газових сумішей є актуа-

льною й для процесів детонаційної фінішної обробки [7].

Для багатьох з перелічених процесів має бути забезпечена висока точність дозування компонентів газової суміші при одночасній високій продуктивності її змішування. Перспективним способом вирішення цієї задачі є застосування методу критичних отворів, що використовує ефект надкритичного витікання газів, при якому забезпечується автоматична стабілізація масової витрати через жиклери [8].

В роботі [9] запропонована модифікація методу критичних отворів за рахунок використання витікання компонент суміші з проміжних посудин постійного або регульованого об'єму. Застосування цього методу передбачає використання системи ЧПК для адаптивного управління процесом генерації суміші. Це в свою чергу робить необхідним визначення об'ємів елементів газового тракту генератора суміші, причому з високою точністю.

Метою даної роботи є розробка способу визначення об'ємів елементів газового тракту генератора

суміші на основі методу критичних отворів, який забезпечує високу точність і швидкість вимірювань.

Методи вимірювання об'єму посудин складної форми

В основу раніш запропонованого генератора газової суміші для термоімпульсного оброблення [10] покладено ідею динамічного сумішоутворення при надкритичному витіканні компонент з проміжних ємностей, об'єм яких може регулюватися (рис. 1). Керування процесом сумішоутворення передбачено за станом газів в цих ємностях. Для цього в ємностях передбачено постійний моніторинг тиску та температури газів. Для забезпечення точності дозування суміші в робочій камері при запропонованій схемі генератора необхідно з високою точністю визначати об'єм елементів газового тракту для урахування частки газу, яка в процесі сумішоутворення залишається у трубопроводах та ємностях. Форма цих елементів є достатньо складною і, як вже відзначалося, об'єм проміжних ємностей може бути змінним. Це потребує застосування засобів контролю об'єму використовуваних посудин, які б забезпечували високу точність і швидкість вимірювань.

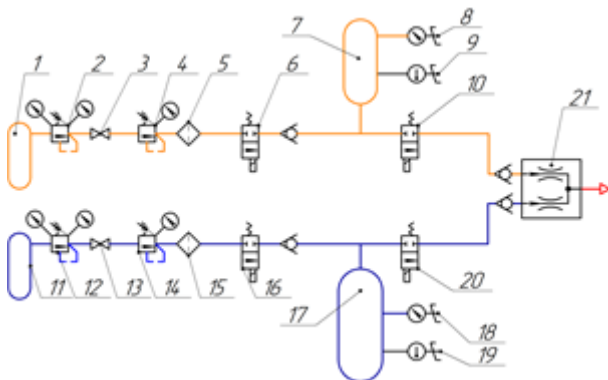


Рис. 1. Схема генератора паливної суміші для прецизійної термоімпульсного оброблення [10]:

- 1, 11 – балони з газом; 2, 4, 12, 14 – редуктор;
- 3, 13 – вентиль; 5, 15 – фільтр;
- 6, 10, 16, 20 – електромагнітний клапан;
- 7, 17 – проміжні ємності; 8, 18 – датчик тиску;
- 9, 19 – датчик температури; 21 – критичні отвори

Одним з найбільш розповсюджених способів вимірювання об'єму посудин складної форми який полягає в заміщенні шуканого об'єму рідиною з подальшим виміром її об'єму високоточним мірником [11] або зважуванням. Для вимірювання посудин складної форми, таких як елементи газового тракту запропонованого генератора сумішей, використання цього способу стикається зі складнощами запобігання утворення газових карманів, що не дозволяє повністю заповнити вимірюваний об'єм рі-

диною. Додаткові похибки при вимірюванні об'єму рідини вносить її залишок на стінках посудини. Використання вагового методу визначення об'єму потребує наявності аналітичних ваг з діапазоном вимірювання до декількох десятків кілограм, що може виявитись проблемним. Додатковим недоліком такого способу є необхідність очищати посудину від рідини після вимірів. Крім того, наявність процедури наповнення і видалення рідини з посудини збільшує тривалість проведення вимірювань.

Відомі технічні рішення, що дозволяють визначати об'єм посудин в повітряному середовищі. Зокрема, відомий ряд способів вимірювання об'єму посудин, наприклад [12, 12] заснованих на вимірі резонансної частоти. Для цього в вимірюваному об'ємі посудини збуджують акустичні коливання з частотою, рівній резонансній частоті вимірюваного об'єму, за значенням якої розраховують значення вимірюваного об'єму. Недоліками способів є складність їх технічної реалізації і низька точність вимірювань для посудин складної форми.

Відомі також способи визначення об'єму в замкнених посудинах, заснованих на вимірі параметрів витікання газу. Наприклад в роботі [14] для вимірювання об'єму великогабаритної оболонки пропонується встановлювати у ній технологічну калібровану течу, під'єднати прилад для вимірювання абсолютного тиску всередині оболонки, заповнити оболонку повітрям з надлишковим тиском і виміряти час падіння тиску в оболонці через зазначену течу на задану заздалегідь величину падіння тиску. Після цього в оболонку встановлюють другу калібровану течу з іншою витратою, вдруге заповнюють оболонку повітрям з таким же надлишковим тиском і вимірюють час падіння тиску через другу течу, після чого визначають обсяг оболонки за формулою.

Недоліком такого способу є низька точність вимірювання, обумовлена тим, що за час вимірювання параметри повітряного середовища в середині вимірюваного об'єму, зокрема, температура, змінюється, що змінює умови витікання і вносить неконтрольовану похибку в результат вимірювання. Крім того, загальним недоліком вказаних способів є підвищена тривалість процедури вимірювання, яка може становити декілька годин. Щодо способів, які передбачають вимірювання параметрів докритичного витікання, то їх загальним недоліком є необхідність застосування пристроїв для вимірювання витрати, які вносять додаткову похибку у остаточний результат визначення об'єму.

Цього недоліку позбавлені способи, які використовують надкритичне витікання газу с вимірюваної посудини. Наприклад, відомий спосіб вимірювання об'єму заснований на заповненні вимірюваної та еталонної посудини стисненим газом до рівного

початкового підвищеного тиску, послідовному дренажу його з кожної посудини при надкритичному витіканні, вимірюванні часу падіння тиску в кожній з ємностей на фіксовану величину та визначенні об'єму вимірюваної ємності за розрахунковою формулою [15]. Недоліком такого способу є низька точність та тривалість вимірювань. Вказані недоліки викликані тим, що при надкритичному витіканні температура газу в посудинах істотно змінюється, що призводить до похибок у визначенні витрати газу. За час витікання температура може стати нерівномірно розподіленою всередині посудини, що вносить неконтрольовану похибку в результат розрахунку вимірюваного об'єму. Підвищений час вимірювань за способом [15], викликаний необхідністю багаторазового дренажу газу з кожної посудини для забезпечення точності розрахунків об'єму. Тому для оперативного контролю об'ємів ємностей в запропонованому генераторі газових сумішей способи на основі надкритичного витікання потребують удосконалення.

Швидкісне вимірювання об'єму при надкритичному витіканні

При надкритичному перепаді тисків миттєве значення масової витрати через критичний отвір визначається виразом [16]:

$$G = \frac{\mu F P}{\sqrt{RT}} \psi,$$

де $\psi = \sqrt{k(2/(k+1))^{k+1}}$; μ – коефіцієнт витрати; F – площа поперечного перерізу критичного отвору.

Поточні значення температури і тиску в ємності визначаються за формулами:

$$T = T_0 (P/P_0)^{\frac{k-1}{k}},$$

$$P = P_0 (1 + Bt)^{\frac{-2k}{k-1}},$$

де T_0, P_0 – початкова температура й тиск у ємності;

$$B = \frac{(k-1)F\sqrt{RT_0}}{2V} \psi.$$

В роботі [17] запропоновано спосіб визначення коефіцієнтів витрати сопел при надкритичному витіканні. Для цього досліджували сопла приєднували до посудини з відомим об'ємом. Посудина наповнювалась повітрям до тиску 2,0 МПа. Площа

перерізів трубопроводів більш ніж в 10 разів перевищувала площу критичного отвору сопла. При надкритичному витіканні повітря вимірювався тиск у посудині. При цьому вимірювання проводились в діапазоні часу 0,5...1,0 с. Такий вибір був обумовлений тим, що за такий час характерна товщина прогріву повітря поблизу стінок ємності $\delta \cong \sqrt{at}$, де a – температуропровідність повітря, не перевищувала 2...3 мм. Виходячи з того, що процес витікання проходив при високих перепадах тиску, товщина цього прошарку не перевищувала 1,5 % від діаметру ємності, що дозволяло вважати процес витікання адіабатичним і виходячи з наведених вище залежностей визначити коефіцієнт витрати сопла як

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{[(P_i/P_0)^{-(k-1)/2k} - 1]}{t_i} \frac{2V}{\psi(k-1)F\sqrt{RT_0}},$$

де N – кількість вимірювань тиску у встановленому діапазоні часу витікання.

Визначивши таким чином коефіцієнт витрати сопла та приєднавши його до вимірюваної ділянки газового тракту можна визначити її об'єм наступним чином. Вимірювана посудина, наповнена стислим газом приєднується до сопла з попередньо визначеним коефіцієнтом витрати за допомогою нормально закритого електромагнітного клапану. Величина тиску в посудині встановлена на рівні, що забезпечує режим надкритичного витікання. Після цього клапан, що з'єднує вимірювану посудину та сопло відкривається і газ з вимірюваної посудини перетікає до оточуючого середовища.

Враховуючи те, що час спрацювання електромагнітних клапанів, які використовуються в газових трактах, може сягати 0,1 с, а також наявність перехідних процесів в газових трактах тривалість яких може сягати до 0,4 с, для більшої точності вимірювання необхідно проводити за умови їх угамування. Зважаючи на це початком для проведення вимірювань доцільно встановити час $t = 0,5$ с. Для усунення випадкових похибок в діапазоні 0,5...1,0 с треба провести серію вимірювань, а шуканий об'єм визначити як їх середнє арифметичне значення:

$$V_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{[(P_i/P_0)^{-(k-1)/2k} - 1]} \frac{\mu \psi (k-1) F \sqrt{RT_0}}{2}.$$

При цьому точність розрахунку об'єму посудини підвищується завдяки визначенню тиску в діапазоні зі збереженням умов адіабатичного витікання та усунення випадкових похибок. Додатково тривалість процесу визначення об'єму вимірюваної посу-

дини обмежується часом до 1 с. Таким чином, запропонований спосіб має забезпечити точність визначення об'єму посудини при одночасному радикальному зменшенні часу вимірювання.

Результати числового моделювання запропонованого методу

Для перевірки принципової можливості реалізації запропонованого способу була використана його імітаційна модель, в якій промодельовано процес визначення об'єму методом скінчених елементів.

На першому етапі за описаною методикою розраховувався коефіцієнт витрати сопла. Для цього в CAD системі була побудована модель еталонної посудини (рис. 2), та визначено її об'єм, який склав $1,575 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

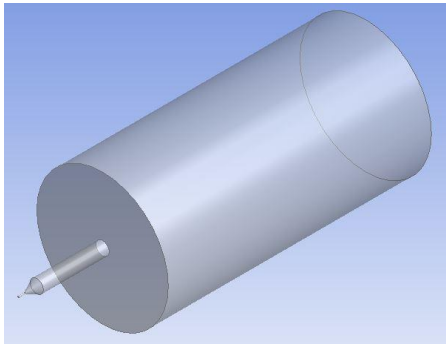


Рис. 2. Модель еталонної посудини для розрахунку коефіцієнту витрати сопла

До посудини примикав короткий трубопровід з соплом, яке являло собою конічний дифузор, що переходив у циліндричну частину. Діаметр перерізу циліндричного каналу складав $\varnothing = 1 \text{ мм}$.

Для визначення параметрів надкритичного витікання для створеної CAD моделі була побудована розрахункова сітка, при цьому в трубопроводі та соплі сітка мала 7 пристінкових шарів, загальна товщина яких обиралась виходячи з розрахунків очікуваної товщини межового шару. Для коректного моделювання витікання струменю газу з сопла до розрахункової області додавалась циліндрична частина (на рис. 2 не показана), на границі якої задавалися умови оточуючого середовища $P = 1 \text{ бар}$, $T = 300 \text{ К}$. З урахуванням короткого часу витікання на стінках було задано умову постійної температури $T = 300 \text{ К}$, а для швидкості потоку задано умову в'язкого прилипання. Як початкові умови у посудині було задано тиск $P = 5 \text{ бар}$, температура $T = 300 \text{ К}$. При цьому вважалось, що вся посудина заповнена азотом $k = 1,404$, $R = 297 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$.

Для моделювання було використано такі налаштування. Модель турбулентності – SAS SST. Крок

розв'язання за часом – адаптивний за числом Куранта ($C < 5$). Схема за часом – second order backward Euler. Інші налаштування вирішувача – high resolution. На рис. 3 наведено графік зміни тиску в еталонній посудині в процесі надкритичного витікання газу. Перехідні процеси тривали до 0,1 с. Розрахунок коефіцієнта витрати в діапазоні часу 0,1...0,3 с мав середнє значення $\mu = 0,753$ з середньоквадратичним відхиленням $\delta = 0,002$.

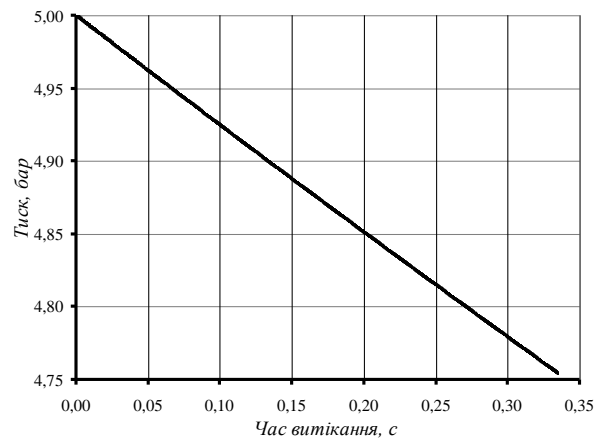


Рис. 3. Залежність тиску в еталонній посудині від часу при надкритичному витіканні

Після цього на другому етапі визначений коефіцієнт витрати використовувався для розрахунку об'єму посудини складної форми (рис. 4). При цьому граничні та початкові умови, а також налаштування вирішувача були ідентичні тим, що використовувалися на першому етапі моделювання.

З урахуванням перехідних процесів для визначення об'єму посудини використовувалися величини тиску в діапазоні часу 0,1...0,3 с.

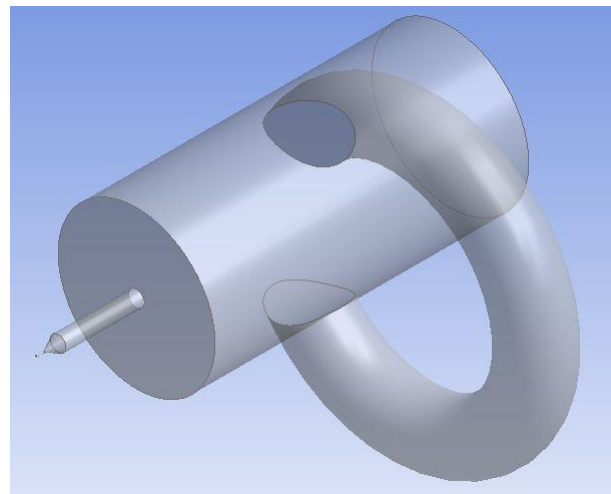


Рис. 4. Модель посудини складної форми для визначення об'єму за параметрами надкритичного витікання

На рис. 5 наведено графік зміни тиску в вимірюваній посудині в процесі надкритичного витікання газу. За визначеними даними тиску та коефіцієнта витрати розрахунок об'єму за наведеною вище залежністю дає значення $V = 2,0771 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ при величині об'єму, визначеній в CAD $2,0784 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Таким чином, точність визначення об'єму по відношенню до даних CAD системи склала 0,0625 %.

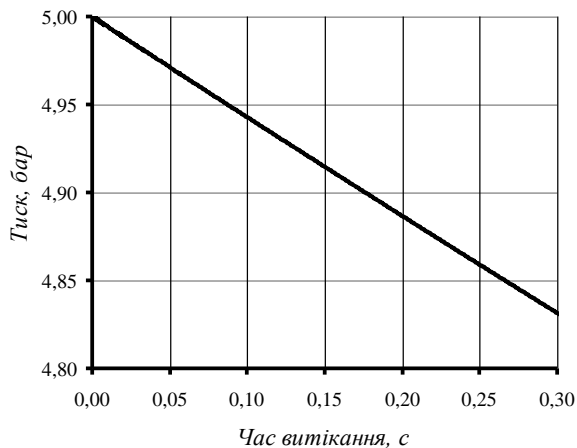


Рис. 5. Залежність тиску в вимірюваній посудині від часу при надкритичному витіканні

Така висока точність обумовлена повною ідентичністю умов надкритичного витікання в розглянутих випадках. Тому для використання запропонованого способу на практиці в склад засобів вимірювання слід включати еталонну посудину з об'ємом визначеним з високою точністю. Вимірювання об'єму слід проводити в два етапи, використовуючи в обох випадках для наповнення однаковий газ, найпростіше – підготовлене (очищене та осушене) повітря.

При цьому на першому етапі за результатами контрольного вимірювання при витіканні з еталонної посудини має уточнюватися значення коефіцієнту витрати, а на другому при витіканні з вимірюваної посудини – шукана величина об'єму. Зважаючи на те, що в обох випадках має використовуватися однаковий газ, однакове сопло та однакові датчики вимірювання тиску слід очікувати точності визначення об'єму близької до розрахункової з похибкою $\Delta \approx 0,1 \%$.

Висновки

1. Запропоновано спосіб швидкісного вимірювання об'єму посудин, що заснований на заповненні вимірюваної посудини газом та його дренажування при надкритичному витіканні з сопла при вимірюванні тиску у посудині, за яким використовують сопло з попередньо визначеним коефіцієнтом витрати;

вимірювання тиску проводять багаторазово в діапазоні від 0,5 до 1 секунди від початку дренажування газу, а об'єм вимірюваної посудини визначають за запропонованою формулою.

2. В ході імітаційного моделювання процесу вимірювання об'єму посудини складної форми на основі запропонованого способу точність визначення об'єму посудини склала 0,0625 % по відношенню до даних CAD системи. Для використання запропонованого способу на практиці в склад засобів вимірювання слід включати еталонну посудину й вимірювання проводити в два етапи, використовуючи в обох випадках однаковий газ. При цьому можна очікувати, що точність визначення об'єму буде мати похибку $\Delta \approx 0,1 \%$.

Література

1. *Modelling of thermal plasmas for arc welding: the role of the shielding gas properties and of metal vapor* [Text] / A. B. Murphy, M. Tanaka, K. Yamamoto et al. // *Journal of Physics D: Applied Physic.* – 2009. – Vol. 42, iss. 19. – Article ID: 194006. DOI: 10.1088/0022-3727/42/19/194006.
2. *Peasura, P. Influence of shielding gas on aluminum alloy 5083 in gas tungsten arc welding* [Text] / P. Peasura, A. Watanapa // *Procedia Engineering.* – 2012. – Vol. 29. – P. 2465–2469. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.01.333.
3. *Femtosecond laser and reactive ion etching based treatments for nanoscale surface texturing of porous silicon carbide* [Text] / A. Notargiacomo, L. Laghi, A. Rinaldi et al. // *Nanotechnology (IEEE-NANO): proc. of the 18th Int. conf. (Cork, Ireland, Jul. 23–26, 2018).* – IEEE, 2018. – 4 p. DOI: 10.1109/NANO.2018.8626393.
4. *Yilbas, B. S. Laser gas assisted treatment of Ti-alloy: analysis of surface characteristics* [Text] / B. S. Yilbas, H. Ali, C. Karatas // *Optics & Laser Technology.* – 2016. – Vol. 78. – P. 159–166. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.11.002.
5. *The influence of gas flow rate on the structural, mechanical, optical and wettability of diamond-like carbon thin films* [Text] / M. Samadi, A. Eshaghi, S. R. Bakhshi, A. A. Aghaei // *Optical and Quantum Electronics.* – 2018. – Vol. 50, iss. 4. – Article ID: 193. DOI: 10.1007/s11082-018-1456-6.
6. *Mauer, G. Process development and coating characteristics of plasma spray-PVD* [Text] / G. Mauer, A. Hospach, R. Vaßen // *Surface and Coatings Technology.* – 2013. – Vol. 220. – P. 219–224. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.08.067.
7. *Планковский, С. И. Перспективы применения современных методов генерации газовых смесей для прецизионной термоимпульсной обработки* [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шинкуль, С. А. Заклинский // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2017. – № 3 (138). – С. 85–93.

8. A high accuracy dilution system for generating low concentration reference standards of reactive gases [Text] / P. J. Brewer, M. D. Miñarro, E. A. di Meane, R. J. C. Brown // *Measurement*. – 2014. – Vol. 47, iss. 1. – P. 607–612. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.09.045.

9. Dynamic method of gas mixtures creation for plasma technologies [Text] / S. I. Plankovskyy, O. V. Shypul, S. A. Zaklinskyy, O. V. Tryfonov // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2018. – Vol. 6 (188). – P. 189–193.

10. Алгоритм управления системой генерации смеси для прецизионной термоимпульсной обработки [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, С. А. Заклинский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2018. – № 5 (149). – С. 58–66. DOI: 10.32620/akt.2018.5.09.

11. Измерение массы, объема и плотности [Текст] / С. И. Гаузнер, С. С. Кивиис, А. П. Осокина, А. Н. Павловский. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 623 с.

12. Method and apparatus for acoustically measuring the volume of an object [Text] : pat. 4640130 USA : Int. Cl.⁴ G01N29/00, G01F17/00 / Sheng H. P., Garza C., Winter D. C., Deskins W. G. ; assignee Baylor College of Medicine. – Appl. No. 665800 ; filed 29.10.1984 ; publ. 03.02.1987. – 9 p.

13. Device for determining the volume of objects using a chamber with two resonators to compensate for temperature and humidity effects [Text] : pat. 5385069 USA : Int. Cl.⁶ G01M7/00, G01N29/00, G01F17/00 / Johnson Jr V. E. ; assignee Hydronautics Research Inc. – Appl. No. 925198 ; filed 06.08.1992 ; publ. 31.01.1995. – 10 p.

14. Веселков, В. В. Совершенствование технологии испытаний на герметичность защитных оболочек атомных судов новых проектов [Текст] / В. В. Веселков, В. П. Рыдловский, В. В. Штайц // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. – 2018. – Т. 10, № 2. – С. 346–355. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-346-355.

15. Способ определения объема емкости [Текст] : а. с. SU1536209A1 СССР : МПК⁽⁵⁾ G01F17/00 / В. Д. Исаков (СССР). – № 4403391/24-10 ; заявл. 28.12.1987 ; опубл. 15.01.1990, Бюл. № 2. – 3 с.

16. Звезгинцев, В. И. Газодинамические установки кратковременного действия [Текст]. В 2 ч. Ч. 1. Установки для научных исследований / В. И. Звезгинцев. – Новосибирск : Параллель, 2014. – 551 с.

17. Быковский, Ф. А. Коэффициенты расхода насадков и их комбинаций при прямом и обратном течении [Текст] / Ф. А. Быковский, Е. Ф. Ведерников // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1996. – Т. 37, № 4. – С. 98–104.

References

1. Murphy, A. B., Tanaka, M., Yamamoto, K., Tashiro, S., Sato, T., Lowke, J. J. Modelling of thermal plasmas for arc welding: the role of the shielding gas properties and of metal vapour. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, vol. 42, iss. 19, article ID: 194006. DOI: 10.1088/0022-3727/42/19/194006.

2. Peasura, P., Watanapa, A. Influence of shielding gas on aluminum alloy 5083 in gas tungsten arc welding. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 29, pp. 2465-2469. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.01.333.

3. Notargiacomo, A., Laghi, L., Rinaldi, A., Möller, H., Hansen, K. K., Araneo, R., Pea, M., Di Gaspare, L., De Seta, M., Bellucci, A., Girolami, M., Orlando, S., Trucchi, D. M. Femtosecond laser and reactive ion etching based treatments for nanoscale surface texturing of porous silicon carbide. *Proc. of 2018 IEEE 18th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO)*, Cork, Ireland, 2018. IEEE, 2018. pp. 1-4. DOI: 10.1109/NANO.2018.8626393.

4. Yilbas, B. S., Ali, H., Karatas, C. Laser gas assisted treatment of Ti-alloy: analysis of surface characteristics. *Optics & Laser Technology*, 2016, vol. 78, pp. 159-166. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.11.002.

5. Samadi, M., Eshaghi, A., Bakhshi, S. R., Aghaei, A. A. The influence of gas flow rate on the structural, mechanical, optical and wettability of diamond-like carbon thin films. *Optical and Quantum Electronics*, 2018, vol. 50, iss. 4, article ID: 193. DOI: 10.1007/s11082-018-1456-6.

6. Mauer, G., Hospach, A., Vaßen, R. Process development and coating characteristics of plasma spray-PVD. *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 220, pp. 219-224. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.08.067.

7. Plankovskii, S. I., Shipul', O. V., Zaklinskii, S. A. Perspektivy primeneniya sovremennykh metodov generatsii gazovykh smesei dlya pretsizionnoi termoiimpul'snoi obrabotki [Application perspectives of modern methods for gas mixtures generating to precision thermal pulse treatment]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2017, vol. 3 (138), pp. 85-93.

8. Brewer, P. J., Miñarro, M. D., di Meane, E. A., Brown, R. J. C. A high accuracy dilution system for generating low concentration reference standards of reactive gases. *Measurement*, 2014, vol. 47, pp. 607-612. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.09.045.

9. Plankovskyy, S. I., Shypul, O. V., Zaklinskyy, S. A., Tryfonov, O. V. Dynamic method of gas mixtures creation for plasma technologies. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2018, vol. 6 (118), pp. 189-193.

10. Plankovskii, S. I., Shipul', O. V., Trifonov, O. V., Zaklinskii, S. A. Algoritm upravleniya sistemoi generatsii smesi dlya pretsizionnoi termoiimpul'snoi obrabotki [Algorithm of mixture generation control system for precision thermal pulse treatment]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace*

technic and technology, 2018, vol. 5 (149), pp. 58–66. DOI: 10.32620/akt.2018.5.09.

11. Gauzner, S. I., Kivilis, S. S., Osokina, A. P., Pavlovskii, A. N. *Izmerenie massy, ob'ema i plotnosti* [Measurement of mass, volume and density]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1972. 623 p.

12. Sheng, H. P., Garza, C., Winter, D. C., Deskins, W. G. *Method and apparatus for acoustically measuring the volume of an object*. Patent USA, no. 4640130, 1987.

13. Johnson Jr, V. E. *Device for determining the volume of objects using a chamber with two resonators to compensate for temperature and humidity effects*. Patent USA, no. 5385069, 1995.

14. Veselkov, V. V., Rydlovskii, V. P., Shtaits, V. V. *Sovershenstvovanie tekhnologii ispytaniya na germetichnost' zashchitnykh obolochek atomnykh sudov novykh proektov* [Advancement of leakages testing technology for testing reactor containments of new atomic vessels]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta mor-*

skogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova, 2018, vol. 10, iss. 2, pp. 346-355. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-346-355.

15. Isakov, V. D. *Sposob opredeleniya ob'ema emkosti* [Method of determining volume of container]. Patent USSR, no. SU1536209A1, 1990.

16. Zvegintsev, V. I. *Gazodinamicheskie ustanovki kratkovremennogo deistviya. Ch. I. Ustanovki dlya nauchnykh issledovaniy* [Gas-dynamic installations of short-term action. Part I. Installations for scientific research]. Novosibirsk, Parallel' Publ., 2014. 551 p.

17. Bykovskii, F. A., Vedernikov, E. F. *Koeffitsienty raskhoda nasadkov i ikh kombinatsii pri pryamom i obratnom techenii* [Flow rates of nozzles and their combinations for forward and reverse flow]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1996, vol. 37, iss. 4, pp. 98–104.

Надійшла до редакції 18.06.2020, розглянута на редколегії 15.08.2020

ПРИМЕНЕНИЕ СОПЕЛ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ИСТЕЧЕНИЯ ДЛЯ СКОРОСТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМА СОСУДОВ

С. И. Планковский, О. В. Шипуль, С. А. Заклинский

Предметом исследования являются способы определения объема сосудов сложной формы. **Целью** работы является разработка и научное обоснование способа скоростного измерения в газовой среде объема внутренней полости сосуда, имеющего сложную геометрическую форму, на основе сверхкритического истечения. В качестве **задачи** исследования определена разработка методики расчета объемов элементов газового тракта ранее предложенного генератора газовых смесей на основе сверхкритического истечения из промежуточных емкостей постоянного объема и подтверждения возможностей предлагаемой методики с помощью имитационного моделирования процесса измерений объема предложенным способом. Получены следующие **результаты**. Предложен способ скоростного измерения объема сосудов сложной формы, основанный на заполнении измеряемого сосуда газом и его дренировании при сверхкритическом истечении из сопла при динамическом измерении давления в сосуде, при котором используют сопло с предварительно определенным коэффициентом расхода с использованием эталонного сосуда. Обоснован диапазон времени измерений для которого с одной стороны выполняются условия подавления переходных процессов в измеряемых сосудах после начала сверхкритического истечения технологического газа, а с другой - обеспечиваются условия адиабатического истечения. В ходе имитационного моделирования измерения объема сосуда сложной формы предлагаемым способом точность определения объема сосуда составила 0,0625% по отношению к данным САД системы. Для использования предложенного способа на практике в состав средств измерения следует включать эталонную сосуд, а сами измерения проводить в два этапа, используя в обоих случаях для заполнения одинаковый газ. При этом на первом этапе по результатам контрольного измерения при истечении с эталонного сосуда уточняется значение коэффициента расхода, а на втором при истечении с измеряемого сосуда определяется искомая величина объема. Процесс непосредственного измерения объема при этом будет продолжаться до 1 секунды, точность определения объема можно ожидать на уровне 0,1%.

Ключевые слова: измерение объема сосудов; сверхкритическое истечение; численное моделирование.

APPLICATION OF CRITICAL NOZZLES FOR FAST MEASUREMENT OF VESSEL VOLUME

S. Plankovskyy, O. Shypul, S. Zaklinskiy

The subject of the study is methods for determining vessel volume with complex shapes. The aim of the study is a development and scientifically substantiate of a method for fast measurement of an internal cavity volume of a vessel having a complex geometric shape in a gaseous medium based on supercritical outflow. The task of the study is the development of a method for calculating the volumes of the gas path components for the previously proposed generator of gas mixtures, which based on the supercritical outflow from intermediate tanks with constant volume,

and confirmation of the proposed method capabilities using a simulation of the volume measurement process by the same method. The following results were obtained. It is proposed the method for fast measurement of vessel volume with complex shape based on supercritical flow through nozzles with the predetermined flow rate and dynamic measured pressure. The range of measurement time is substantiated for which, on the one hand, the conditions for suppressing transient processes in the measured vessels after the beginning of the supercritical outflow of the process gas are satisfied, and on the other hand, the conditions for adiabatic outflow are provided. According to the simulation of measuring the volume of a complex-shaped vessel using the proposed method, the accuracy of determining the volume of the vessel was 0.0625% in relation to the CAD system data. To use the proposed method in practice, the measuring equipment should include a reference vessel, and the measurements themselves should be carried out in two stages, using the same gas for filling in both cases. In this case, at the first stage, according to the results of the control measurement when it expires from the reference vessel, the value of the flow coefficient is specified, and at the second stage, when it expires from the measured vessel, the required target volume is determined. The process of direct volume measurement, in this case, lasts up to 1 second, the accuracy of volume determination is expected to be 0.1%.

Keywords: vessel volume measurement; supercritical flow; numerical simulation.

Планковський Сергій Ігорович – д-р техн. наук, проф., декан факультету літакобудування, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Шипуль Ольга Володимирівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Заклінський Сергій Олександрович – ас. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Sergiy Plankovsky – Doctor of Techn. Sci., Professor, Dean of Aircraft Building Faculty, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: s.plank@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0003-2908-903X, Scopus Author ID: 24473286300, Researcher ID: I-5171-2018.

Olga Shypul – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.shipul@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-1356-5831, Scopus Author ID: 57192959380, Researcher ID: AAD-1985-2020

Sergey Zaklinsky – Assistant of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: s.zaklinsky@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0003-3287-5795, Scopus Author ID: 57204572302.