

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
Міністерство освіти і науки України

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЗАКЛІНСЬКИЙ СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.785.013:533.27 (043)

ДИСЕРТАЦІЯ

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КРИТИЧНИХ ОТВОРІВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ
ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ У ПРОЦЕСАХ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНОЇ ОБРОБКИ

05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки

13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Заклінський Сергій Олександрович

Науковий керівник Планковський Сергій Ігорович, доктор технічних наук,
професор

Харків – 2024

АНОТАЦІЯ

Заклінський Сергій Олександрович. Удосконалення методу критичних отворів для генерації газових сумішей у процесах фізико-технічної обробки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних за спеціальністю 05.03.07 Процеси фізико-технічної обробки. – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Міністерство освіти і науки України, Харків, 2024.

Дисертаційну роботу присвячено розробці удосконаленого методу критичних отворів для генерації газових сумішей у процесах фізико-технічної обробки.

У сучасному виробництві та технологічних процесах широко використовуються газові суміші з різноманітним складом. Це стосується таких галузей, як метрологічне забезпечення виробничих процесів, зварювальні роботи, вакуумно-плазмові технології, лазерні технології, термоімпульсна обробка, де вимоги до точності та стабільності складу газових сумішей надзвичайно високі.

Складність досягнення зазначених високих вимог зумовлено не лише багатокомпонентністю суміші, але й необхідністю досягнення її гомогенності та гарантованого співвідношення газових компонентів у суміші з похибкою менше відсотка. Це особливо критично в контексті технологічних процесів, де навіть невеликі відхилення складу суміші від заданого можуть впливати на якість та результативність обробки матеріалів чи виробничого циклу.

У контексті нових матеріалів виникає необхідність розробки інноваційних стратегій для поліпшення якості зварювальних швів. Зважаючи на різноманіття хімічних властивостей газів, величини їх концентрації можуть виявити значний вплив на процес зварювання. Наприклад, при використанні методу зварювання MAG (електродугове зварювання в активному захисному

газі) кількість бризок суттєво залежить від концентрації компонентів у застосованій газовій суміші. Наприклад, при 10 % CO₂ в газовій суміші Ar-CO₂ в процесі зварювання конструкційної сталі SM490A (аналог 17ГС) утворюються бризки загальною масою 0,3 г за хвилину, а при збільшенні вмісту CO₂ до 30 % – 0,5 г/хв.

В іонно-плазмових технологіях важливим є вибір оптимального складу газової суміші, оскільки це визначально впливає на досягнення бажаного результату й оптимізацію ефективності процесу. Концентрація різних газів у складі суміші істотно впливає на параметри іонно-плазмової обробки. Зокрема, при іонно-плазмовому нанесенні покриттів кількість азоту в камері визначає його кількість в отриманому шарі.

Для прецизійної термоімпульсної обробки навіть мінімальні зміни в усередненому питомому тепловому потоці, які зумовлені похибками в компонентному складі суміші, впливають на точність радіуса заокруглення кромки.

Однією з основних переваг використання методу отворів із критичним перерізом є його здатність створювати складні багатокомпонентні газові суміші, подібні до двокомпонентних, за допомогою відповідної кількості отворів. Цей метод відкриває можливість для виробництва великих обсягів газових сумішей. Витрати можуть різнитися в значному діапазоні, від декількох мілілітрів до десятків літрів на хвилину, що робить його надзвичайно гнучким та ефективним в індустріальних застосуваннях.

Метод отворів із критичним перерізом виступає як один з найбільш точних серед динамічних засобів формування газових сумішей. Цей метод не лише забезпечує найвищу продуктивність у генерації сумішей у широкому діапазоні концентрацій, але й виявляє невеликі відхилення в співвідношенні компонентів. У його базовому варіанті похибка дозування компонентів становить – 0,5 %. Водночас перспективні процеси фізико-технічної обробки потребують застосування газових сумішей з похибкою дозування компонентів

– до 0,1 %. Тому підвищення точності методів генерації газових сумішей є актуальним завданням.

У зв'язку з вищезазначеним, розробка високоефективних газозмішуючих систем, які забезпечують не лише високу точність вмісту кожного компонента в складній газовій суміші, але й стабільність її складу у виробничих умовах, у сучасному світі є необхідною передумовою для забезпечення високих стандартів якості.

На основі проведених досліджень запропоновано вдосконалений метод отворів із критичним перерізом для генерації багатоконпонентних газових сумішей, що полягає в подачі компонентів з посудин, що передбачають регулювання об'єму, згідно з виконанням умови забезпечення рівності температур газів у посудинах під час їхнього перетікання, що дозволяє забезпечувати задане масове співвідношення компонентів у робочій посудині із сумішшю без додаткового регулювання. Запропоновано спосіб зменшення нетехнологічних витрат газів при продувці посудин через зміну їх об'єму до мінімального.

Розроблено аналітичну модель удосконаленого методу генерації двокомпонентної суміші за заданим співвідношенням масових концентрацій компонентів для наповнення робочої камери термоімпульсного устаткування, за якою визначаються об'єм та початковий тиск в посудинах з компонентами газової суміші. Розроблені числові моделі елементів вдосконаленого генератора газових сумішей.

Для забезпечення заданої точності запропоновані методики визначення характеристик системи генерації газової суміші. Запропоновано метод швидкісного визначення об'єму посудини довільної форми, що включає заповнення вимірюваної посудини газом та його дренажування при надкритичному витіканні із сопла, для якого попередньо визначено коефіцієнт витрати, з багаторазовим вимірюванням тиску в посудині, яке проводять у діапазоні від 0,5 до 1 секунди. Розроблено методику визначення площини

критичного перерізу в отворі, за якою вимірюються мінімальні та максимальні розміри отвору, після чого будується його профіль та визначається його площа. Запропоновано методику визначення коефіцієнту витрати сопла.

Розроблено прецизійний генератор газових сумішей на основі технічних рішень вдосконаленого методу отворів із критичним перерізом, у якому компоненти суміші подають із попередньо наповнених до початкового тиску проміжних посудин, які передбачають регулювання об'єму, що дозволяє забезпечити похибку дозування компонентів паливної суміші на рівні до 0,1 % за масою. Розроблена блок-схема алгоритму керування генерацією газової суміші на термоімпульсному устаткуванні. Вихідні дані для генерації суміші, які вносяться до бази даних системи ЧПК, є характеристики компонентів суміші, об'єми проміжних посудин, паразитні об'єми та значення коефіцієнтів витрат отворів з критичним перерізом.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційної роботи полягає в такому.

1. Удосконалено динамічний метод отворів із критичним перерізом для генерації багатокомпонентних газових сумішей, що використовуються в процесах фізико-технічної обробки та полягає в подачі компонентів з посудин, що передбачають регулювання об'єму згідно з виконанням умови забезпечення рівності температур газів у посудинах під час їхнього перетікання, що дозволяє забезпечити похибку дозування компонентів паливної суміші на рівні до 0,1 % за масою.

2. Уперше розроблено математичну модель для визначення об'ємів та початкового тиску в посудинах з компонентами газової суміші для удосконаленого методу отворів із критичним перерізом, що дозволяє забезпечувати задане масове співвідношення компонентів у робочій посудині із сумішшю без використання додаткового регулювання.

3. Уперше запропоновано метод швидкісного визначення об'єму посудини довільної форми, що включає заповнення вимірюваної посудини

газом та його дренування при надкритичному витіканні із сопла, для якого попередньо визначено коефіцієнт витрати, з багаторазовим вимірюванням тиску в посудині, яке проводять у діапазоні від 0,5 до 1 секунди.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено систему генерації багатокomпонентної газової суміші для процесів фізико-технічної обробки на базі вдосконаленого методу отворів із критичним перерізом, у якому компоненти суміші подають із попередньо наповнених до початкового тиску проміжних посудин, що передбачають регулювання об'єму. Ця система дає змогу отримувати газові суміші з відхиленням складу на рівні до 0,1 % за масою.

2. Розроблено методику визначення характеристик системи генерації багатокomпонентної газової суміші, яка дозволяє отримати необхідні параметри для формулювання закону керування виконавчими елементами, що забезпечує необхідну точність дозування компонентів.

3. Запропоновано спосіб визначення об'єму посудини довільної форми, що може бути застосований для широкого кола задач, у яких використовується наповнення вимірюваних посудин газом з тиском, що забезпечує надкритичне витікання газу в атмосферу.

Результати роботи впроваджено на ТОВ «Науково-виробниче підприємство Пластар», ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» та використано в навчальному процесі кафедри технології виробництва літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», про що отримані відповідні акти. На запропонований спосіб генерації газової суміші отримано патент на винахід, що пройшов кваліфікаційну експертизу.

Ключові слова: генерація газових сумішей, точність дозування компонентів газової суміші, гомогенність газової суміші, математична модель газодинамічного процесу, числове моделювання, критичне перетікання, термоімпульсна обробка.

ABSTRACT

Zaklinskyi Serhii. Improvement of the Critical Orifice Method for Generating Gas Mixtures in Physical and Technical Treatment Processes. – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.03.07 Processes of Physical and Technical Treatment. – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The thesis is dedicated to the development of an improved method of critical orifices for generating gas mixtures in physical and technical treatment processes.

Gas mixtures with various compositions are widely used in modern production and technological processes. This applies to such industries as metrological support of production processes, welding works, vacuum-plasma technologies, laser technologies, thermal pulse processing, where the requirements for accuracy and stability of the composition of gas mixtures are extremely high.

The difficulty of achieving these high requirements is caused not only by the multicomponent nature of the mixture, but also by the need to achieve its homogeneity and a guaranteed ratio of gas components in the mixture with an error of less than one percent. This is especially critical in the context of technological processes, where even small deviations of the composition of the mixture from the given can affect the quality and effectiveness of processing materials or the production cycle.

In the context of new materials, there is a need to develop innovative strategies to improve the quality of welding seams. Given the variety of chemical properties of gases, their concentration values can have a significant impact on the welding process. For example, when using the MAG welding method (electric arc welding in an active shielding gas), the number of spatters significantly depends on the concentration of components in the gas mixture used. For example, at 10 % CO₂ in the Ar-CO₂ gas mixture, in the process of welding structural steel SM490A (similar

to 17GS), spatter with a total mass of 0.3 g per minute is formed, and when the CO₂ content increases to 30 % – 0.5 g/min.

In ion-plasma technologies, it is important to choose the optimal composition of the gas mixture, as this has a decisive effect on achieving the desired result and optimizing the efficiency of the process. The concentration of various gases in the composition of the mixture significantly affects the parameters of ion-plasma treatment. In particular, during ion-plasma coating, the amount of nitrogen in the chamber determines its amount in the resulting layer.

For precision thermal pulse processing, even minimal changes in the averaged specific heat flow, which are caused by errors in the component composition of the mixture, affect the accuracy of the edge rounding radius.

One of the main advantages of using the critical cross-section orifice method is its ability to produce complex multicomponent gas mixtures similar to two-component gas mixtures with the appropriate number of orifices. This method opens the possibility for the production of large volumes of gas mixtures. Flow rates can vary widely, from a few milliliters to tens of liters per minute, making it extremely flexible and efficient in industrial applications.

The method of holes with a critical section is one of the most accurate among the dynamic means of forming gas mixtures. This method not only provides the highest performance in the generation of mixtures over a wide range of concentrations, but also detects small deviations in the ratio of components. In its basic version, the component dosage error is 0.5 %. At the same time, promising processes of physical and technical processing require the use of gas mixtures with a component dosage error of up to 0.1 %. Therefore, increasing the accuracy of methods for generating gas mixtures is an urgent task.

In connection with the above, the development of highly efficient gas mixing systems, which ensure not only high accuracy of the content of each component in a complex gas mixture, but also stability in production conditions, in the modern world is a necessary prerequisite for ensuring high quality standards.

On the basis of the conducted research, an improved method of holes with a

critical section for the generation of multicomponent gas mixtures is proposed, which consists in supplying components from vessels that provide for volume regulation, in accordance with the fulfillment of the condition of ensuring the equality of the temperatures of gases in the vessels during their flow, which allows to ensure given mass ratio of components in a working vessel with a mixture without additional adjustment. A method of reducing non-technological gas consumption during the purging of vessels by changing their volume to a minimum is proposed.

An analytical model of the improved method of generating a two-component mixture based on a given ratio of mass concentrations of the components for filling the working chamber of the thermopulse equipment, which determines the volume and initial pressure in the vessels with the components of the gas mixture, has been developed. Numerical models of the elements of the improved gas mixture generator were developed.

To ensure the specified accuracy, the methods of determining the characteristics of the gas mixture generation system are proposed. A method of rapid determination of the volume of a vessel of arbitrary shape is proposed, which includes filling the measured vessel with gas and draining it during supercritical outflow from the nozzle, for which the flow coefficient is previously determined, with multiple measurements of the pressure in the vessel, which is carried out in the range from 0.5 to 1 seconds. A technique for determining the plane of the critical section in the hole has been developed, according to which the minimum and maximum dimensions of the hole are measured, after which its profile is built.

The Scientific Novelty of the obtained results.

1. The dynamic method of holes with a critical cross-section for the generation of multicomponent gas mixtures used in physical and technical processing processes has been improved and consists in supplying components from vessels that provide for volume regulation in accordance with the condition of ensuring the equality of gas temperatures in the vessels during their overflow, which allows to ensure an error in the dosage of the components of the fuel mixture at the level of up to 0.1 % by mass.

2. For the first time, a mathematical model was developed for determining volumes and initial pressure in vessels with components of a gas mixture for the improved method of holes with a critical section, which allows to ensure the given mass ratio of components in a working vessel with a mixture without using additional regulation.

3. For the first time, a method of rapid determination of the volume of a vessel of arbitrary shape is proposed, which includes filling the measured vessel with gas and draining it during supercritical outflow from the nozzle, for which the flow coefficient is previously determined, with multiple measurements of the pressure in the vessel, which is carried out in the range from 0, 5 to 1 second..

The Practical Significance of the obtained results.

1. A system for generating a multicomponent gas mixture for physical and technical processing processes has been developed based on the improved method of holes with a critical section, in which the components of the mixture are supplied from intermediate vessels pre-filled to the initial pressure, which provide for volume regulation. This system makes it possible to obtain gas mixtures with a composition deviation of up to 0.1 % by mass.

2. A method of determining the characteristics of the multicomponent gas mixture generation system has been developed, which allows obtaining the necessary parameters for formulating the law of control of executive elements, which ensures the necessary accuracy of component dosing.

3. A method of determining the volume of a vessel of arbitrary shape is proposed, which can be applied to a wide range of problems, in which filling of the measured vessels with gas at a pressure that ensures supercritical leakage of gas into the atmosphere is used.

The results of the work were implemented at LLC Research and Production Enterprise Plastar, SE Design Office "Pivdenne" named after M. K. Yangel" and used in the educational process of the Department of Aircraft Production Technology of the National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", about which relevant acts have been received. An invention patent was obtained for

the proposed method of gas mixture generation, which passed the qualification expertise.

Keywords: gas mixture generation; accuracy of gas mixture component dosing; homogeneity of gas mixture; mathematical model of gas dynamic process; numerical simulation; critical flow; thermo-impulse processing.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, у яких опубліковані основні наукові результати дисертаційної роботи

Монографії (розділи у колективних монографіях)

1. Розробка генератора паливної суміші для прецизійного термоімпульсного оброблення / С. О. Заклінський та ін. // Розроблення автоматизованого комплексу для прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами наукові матеріали : монографія / Планковський С. І., та ін. ; ред. С. І. Планковський. – Харків, Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – 2020. – С. 134–171.

Статті в наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України

2. Планковський С.І. Перспективи застосування сучасних методів генерації газових сумішей для прецизійної термоімпульсної обробки / Планковський С.І., Шипуль О.В., Заклінський С.О. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2017. – № 3 (138). – С. 85–93. – Режим доступу: <http://nti.khai.edu/ojs/index.php/aktt/article/download/aktt.2017.3.06/552>

3. Алгоритм управління системою генерації суміші для прецизійної термоімпульсної обробки / Планковський С. І., Шипуль О. В., Трифонов О. В., Заклінський С. О. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2018. – № 5 (149). – С. 58–66. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/aktt.2018.5.09>

4. Планковський С. І. Застосування сопел надкритичного витікання для швидкісного вимірювання об'єму посудин / Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2020. – № 4 (164). – С. 66–73. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/aktt.2020.4.08>

5. Числове дослідження змішування в системі генерації газової суміші / Гайдачук В.Є., Шипуль О.В., Заклінський С.О., Гарін В.О., Трифонов О.В., Планковський С.І. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2021. – № 6 (176). – С. 39–47. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/aktt.2021.6.05>

6. Числове та еспериментальне дослідження наповнення резервуару компонентом газової суміші / Шипуль О. В., Заклінський С. О., Комбаров В. В., Павленко О. А., Гарін В. О. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – № 4 (172). – С. 63–72. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/aktt.2021.4.09>

7. Розробка цифрового близнюка наповнення резервуару газовою сумішшю / Гарін В.О., Ткаченко Д.А., Шипуль О.В., Заклінський С.О., Трифонов О.В, Планковський С.І. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2022. – № 5 (183). – С. 40–50. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.5.03>

8. Dynamic method of gas mixtures creation for plasma technologies / Plankovskyy S., Shypul O., Zaklinsky S., Tryfonov O. // *Problems of atomic science and technology*. – 2018. – №. 6 (118). – P. 189–193. – Режим доступу: https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2018_6/article_2018_6_189.pdf

Статті в наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію

9. A digital twin design of induction motor with squirrel-cage rotor for insulation condition prediction / Pliuhin V., Zaklinsky S., Plankovskyy S., Tsegelnyk Y., Aksonov O., Kombarov V. // *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. – 2023. – Issue 14. – P. 185–191. – Mode of access: <http://doi.org/10.17683/ijomam/issue14.22>

Патенти на винахід, що пройшли кваліфікаційну експертизу

10. Спосіб генерації газової суміші : патент України № 125380 : МПК B01F3/02, B01F 13/00, G05D 11/00 / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, С. О. Заклінський, Г. С. Тевзадзе. – № а201810303 ; заявл. 17.10.2018 ; опубл. 02.03.2022, Бюл. № 9. – 4 с. – Режим доступу: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=125380&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

11. Планковський С. І. Шляхи створення прецизійної системи сумішеутворення для термоімпульсної обробки / Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні : тези доп. всеукр. наук.-техн. конф., [Харків], 15-17 листоп. 2016 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2016. – Т. 1. – С. 34.

12. Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. Вибір методу підготовки газової суміші для термоімпульсної обробки // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., [Харків], 20-21 квіт. 2017 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т». – Харків, 2017. – С. 59.

13. Планковський С. І. Проектування сопла для підготовки газової суміші при термоімпульсній обробці прецизійних деталей літальних апаратів / Планковський С. І., Заклінський С. О. // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., [Харків], 17-18 квіт. 2018 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2018. – С. 51.

14. Планковський С. І. Особливості конструкції газонаповнювальної системи термоімпульсної установки / Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., [Харків] 23-24 квіт. 2019 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2019. – С. 59.

15. Планковський С. І. Моделювання генератора паливної суміші термоімпульсної установки / Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. // New leading technologies in machine bulding : proceedings XXIX international conference., [Koblevo – Kharkiv], 3-8 sept. 2019 / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2019. – С. 94.

16. Гарін В. О. Основи створення «цифрового близнюка» газонаповнювальної системи термоімпульсної установки / Гарін В. О., Заклінський С. О., Трифонов О.В. // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., [Харків], 28-29 квіт. 2020 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2020. – С. 30.

17. A Method of Rapid Measurement of Vessels Volume with Complex Shape by Critical Nozzles / Plankovsky S., Shypul O., Zaklinsky S., Tsegelnyk Y., Kombarov V. (2021). In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds) // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2020. ICTM 2020 / Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. – vol 188. – P. 247–255. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_20

18. Numerical simulations of mixture formation to ensuring the quality of thermal deburring / S. Plankovsky, O. Shypul, S. Zaklinsky, Y. Tsegelnyk, O. Bezkorovaina // International Conference on Advanced Mechanical and Power Engineering (CAMPE 2021). October 29-30, 2021 / Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham. – 2022. – P. 108–117. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-031-18487-1_11

19. Development of a Digital Twin of Reservoir Filling by Gas Mixture Component / Shypul O., Garin V., Tkachenko D., Zaklinsky S., Tryfonov O., Plankovsky S. // Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2022) / Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2023. – P. 85–98. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30251-0_7

Список наукових публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації

20. Спосіб визначення об'єму посудини : патент України на корисну модель № 147610 : МПК G01F 17/00 / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С.О. Заклінський, Є. В. Цегельник, В. В. Комбаров. – № u202007627 ; заявл. 30.11.2020 ; опубл. 26.05.2021, Бюл. № 21. – 5 с. – Режим доступу: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITI

AL_FORMS=1&form-AX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=147610&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

21. Спосіб визначення об'єму посудини : патент України на корисну модель № 147597 : МПК G01F 17/00 / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С.О. Заклінський, Є. В. Цегельник, В. В. Комбаров. – № u202006623 ; заявл. 15.10.2020 ; опубл. 26.05.2021, Бюл. № 21. – 4 с. – Режим доступу: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=147597&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

22. Спосіб приготування газової суміші заданого складу : патент України на корисну модель № 146262 : МПК B01F 3/00 / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С.О. Заклінський, Є. В. Цегельник, В. В. Комбаров, Г. С. Тевзадзе, В. О. Гарін. – № u202005803 ; заявл. 10.09.2020 ; опубл. 03.02.2021, Бюл. № 5. – 4 с. – Режим доступу: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=146262&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

ЗМІСТ

ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЗАДАЧ ПРИ ГЕНЕРАЦІЇ СУМІШЕЙ ГАЗІВ ДЛЯ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНОЇ ОБРОБКИ	27
1.1 Використання газових сумішей в процесах фізико-технічної обробки.....	27
1.1.1 Використання газових сумішей в процесах зварювання	27
1.1.2 Використання газових сумішей в іонно-плазмових технологіях..	30
1.1.3 Використання газових сумішей в детонаційних процесах	31
1.2 Вимоги до точності дозування компонент	32
1.2.1 Вплив концентрації компонента газу на процес зварювання.....	32
1.2.2 Вплив концентрації компонента газу на параметри плазми	34
1.2.3 Вимоги до суміші для прецизійної термоімпульсної обробки.....	36
1.3 Сучасні методи генерації газових сумішей.....	38
1.4 Застосування методу критичних отворів для динамічного генерування газових сумішей	45
Висновки до розділу 1, постановка мети і завдань дослідження.....	47
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ВДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КРИТИЧНИХ ОТВОРІВ	49
2.1 Розробка технічних рішень для підвищення точності методу критичних отворів.....	49
2.2 Аналітична модель сумішоутворення при застосуванні запропонованого методу	56
2.3 Розробка числової моделі удосконаленого генератора газових сумішей	64
2.3.1 Моделювання наповнення резервуару компонента	69
2.3.2 Моделювання змішувача (забезпечення гомогенності суміші)	78
2.3.3 Моделювання наповнення камери	86

	18
2.4 Перспективи подальшого удосконалення запропонованого методу на базі використання технології цифрових близнюків	89
Висновки до розділу 2	90
РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ВИТІКАННЯ ГАЗІВ З ПРОМІЖНИХ ЄМНОСТЕЙ ТА НАТІКАННЯ ГАЗІВ У КАМЕРУ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ	92
3.1 Визначення коефіцієнтів витрат сопел	92
3.2 Визначення площин поперечних перерізів отворів у соплах.....	95
3.3 Вимірювання об'ємів ємностей.....	97
3.3.1 Удосконалення вимірювання об'єму посудини через зміну її об'єму на відому величину	101
3.3.2 Удосконалення вимірювання об'єму за надкритичного витікання	103
3.4 Визначення компонентного складу газів, які застосовуються під час досліджень генератора суміші	108
3.5 Визначення частки газу, яка залишається в паразитних об'ємах	111
3.6 Експериментальне дослідження наповнення проміжної ємності.....	115
Висновки до розділу 3	124
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ПРЕЦИЗІЙНОГО ГЕНЕРАТОРА ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ...	126
4.1 Опис розробленої схеми генератора газової суміші	127
4.2 Опис алгоритму роботи генератора газової суміші	132
4.3 Структура й організація роботи програмно-апаратного комплексу....	144
4.3.1 Вибір підходів для розробки системи управління генератором газової суміші.....	144
4.3.2 Вибір підходу для розробки апаратної частини комплексу	147
4.3.3 Програмна частина.....	149
4.3.4 Логічні пристрої, керування структурними елементами генератора газової суміші в системі ЧПК	152

	19
4.4 Забезпечення безпеки при роботі з устаткуванням	155
Висновки до розділу 4	158
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	159
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	161
ДОДАТОК А.....	175
ДОДАТОК Б	180

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. У сучасному виробництві та технологічних процесах широко використовуються газові суміші з різноманітним складом. Це стосується таких галузей, як метрологічне забезпечення виробничих процесів, зварювальні роботи, вакуумно-плазмові технології, лазерні технології, термоімпульсна обробка, де вимоги до точності та стабільності складу газових сумішей надзвичайно високі.

Складність досягнення зазначених високих вимог зумовлено не лише багатоконпонентністю суміші, але й необхідністю досягнення її гомогенності та гарантованого співвідношення газових компонентів у суміші з похибкою менше відсотка. Це особливо критично в контексті технологічних процесів, де навіть невеликі відхилення складу суміші від заданого можуть впливати на якість та результативність обробки матеріалів чи виробничого циклу.

У контексті нових матеріалів виникає необхідність розробки інноваційних стратегій для поліпшення якості зварювальних швів. Зважаючи на різноманіття хімічних властивостей газів, величини їх концентрації можуть виявити значний вплив на процес зварювання. Наприклад, при використанні методу зварювання MAG (електродугове зварювання в активному захисному газі) кількість бризок суттєво залежить від концентрації компонентів у застосованій газовій суміші. Наприклад, при 10 % CO_2 в газовій суміші Ar- CO_2 в процесі зварювання конструкційної сталі SM490A (аналог 17ГС) утворюються бризки загальною масою 0,3 г за хвилину, а при збільшенні вмісту CO_2 до 30 % – 0,5 г/хв.

В іонно-плазмових технологіях важливим є вибір оптимального складу газової суміші, оскільки це визначально впливає на досягнення бажаного результату й оптимізацію ефективності процесу. Концентрація різних газів у складі суміші істотно впливає на параметри іонно-плазмової обробки. Зокрема, при іонно-плазмовому нанесенні покриттів кількість азоту в камері визначає його кількість в отриманому шарі.

Для прецизійної термоімпульсної обробки навіть мінімальні зміни в усередненому питомому тепловому потоці, які зумовлені похибками в компонентному складі суміші, впливають на точність радіуса заокруглення кромки.

Однією з основних переваг використання методу отворів із критичним перерізом є його здатність створювати складні багатокомпонентні газові суміші, подібні до двокомпонентних, за допомогою відповідної кількості отворів. Цей метод відкриває можливість для виробництва великих обсягів газових сумішей. Витрати можуть різнитися в значному діапазоні, від декількох мілілітрів до десятків літрів на хвилину, що робить його надзвичайно гнучким та ефективним в індустріальних застосуваннях.

Метод отворів із критичним перерізом виступає як один з найбільш точних серед динамічних засобів формування газових сумішей. Цей метод не лише забезпечує найвищу продуктивність у генерації сумішей у широкому діапазоні концентрацій, але й виявляє невеликі відхилення в співвідношенні компонентів. У його базовому варіанті похибка дозування компонентів становить – 0,5 %. Водночас перспективні процеси фізико-технічної обробки потребують застосування газових сумішей з похибкою дозування компонентів – до 0,1 %. Тому підвищення точності методів генерації газових сумішей є актуальним завданням.

У зв'язку з вищезазначеним, розробка високоефективних газозмішуючих систем, які забезпечують не лише високу точність вмісту кожного компонента в складній газовій суміші, але й стабільність її складу у виробничих умовах, у сучасному світі є необхідною передумовою для забезпечення високих стандартів якості.

Мета дослідження. Розробка методу генерації газових сумішей для процесів фізико-технічної обробки з підвищеною точністю дозування компонентів на основі динамічного методу отворів із критичним перерізом.

Для досягнення поставленої мети, необхідно вирішити такі **завдання**: розробити удосконалену схему динамічного методу отворів із критичним

перерізом, яка підвищить точність складу газових сумішей; розробити математичну модель для визначення технологічних параметрів при застосуванні запропонованого методу та провести аналіз можливості застосування прийнятих технічних рішень; розробити методики для визначення характеристик системи генерації газових сумішей на основі запропонованого методу, які б забезпечували заданий рівень точності компонентного складу суміші; розробити прецизійний генератор газових сумішей на основі запропонованих технічних рішень.

Об'єкт дослідження: процес генерації газової суміші для фізико-технічної обробки.

Предмет дослідження: математичне моделювання процесів генерації газових сумішей методом отворів із критичним перерізом та реалізація прийнятих технічних рішень.

Методи дослідження: теоретичні – математичне моделювання генерації газової суміші та її газодинамічної течії; експериментальні – натурний експеримент контролю наповнення газом робочої та проміжної посудин.

Досліджування виконувались на експериментальному стенді генерації газових сумішей у лабораторних умовах з використанням сучасної контрольно-вимірювальної апаратури. Фактичні форми і розміри отворів у соплах визначалося з використанням інструментального мікроскопа із цифровою шкалою БМІ-1Ц. Для тарування датчиків тиску використовувався вантажопоршневий манометр класу точності 0,05.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому.

1. Удосконалено динамічний метод отворів із критичним перерізом для генерації багатокомпонентних газових сумішей, що використовуються в процесах фізико-технічної обробки та полягає в подачі компонентів з посудин, що передбачають регулювання об'єму згідно з виконанням умови забезпечення рівності температур газів у посудинах під час їхнього перетікання, що дозволяє забезпечити похибку дозування компонентів паливної суміші на рівні до 0,1 % за масою.

2. Уперше розроблено математичну модель для визначення об'ємів та початкового тиску в посудинах з компонентами газової суміші для удосконаленого методу отворів із критичним перерізом, що дозволяє забезпечувати задане масове співвідношення компонентів у робочій посудині із сумішшю без використання додаткового регулювання.

3. Уперше запропоновано метод швидкісного визначення об'єму посудини довільної форми, що включає заповнення вимірюваної посудини газом та його дренажування при надкритичному витіканні із сопла, для якого попередньо визначено коефіцієнт витрати, з багаторазовим вимірюванням тиску в посудині, яке проводять у діапазоні від 0,5 до 1 секунди.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційне дослідження виконано самостійно: обґрунтовано загальну концепцію роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, обрано підходи для вирішення поставлених завдань.

Основні результати за темою дисертації викладено у 22 публікаціях, з яких 1 розділ у монографії, 7 статей у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, 1 стаття в науковому періодичному виданні іншої держави із напрямку з якого підготовлено дисертацію, 1 патент на винахід, що пройшов кваліфікаційну експертизу, 9 публікацій у матеріалах міжнародних наукових конференцій, 3 патенти на корисну модель, які додатково відображають наукові результати дисертації.

У працях, написаних у співавторстві, авторів належить таке: розробка генератора паливної суміші для прецизійного термоімпульсного оброблення, принципи сумішоутворення при прецизійному термоімпульсному обробленні, алгоритм керування системою генерації суміші для прецизійного термоімпульсного оброблення, схема й опис роботи розробленого генератора паливної суміші, спосіб приготування газової суміші заданого складу [41, 50,]. спосіб зменшення непродуктивних витрат газу при попередній підготовці посудини [51]; огляд методів генерації газової суміші з високоточним співвідношенням компонентів, їх особливостей, переваг і недоліків стосовно термоімпульсного обладнання, обґрунтування

застосування найбільш перспективного методу отворів із критичним перерізом [26, 25, 21]; алгоритм керування генерацією суміші для прецизійної термоімпульсної обробки, методика вибору діаметрів отворів із критичним перерізом, об'ємів проміжних посудин та початкового тиску в них та тривалості наповнення робочої камери термоімпульсного устаткування [1]; спосіб швидкісного вимірювання об'єму посудин складної форми, що заснований на заповненні вимірюваної посудини газом та його дренажу за надкритичного витікання із сопла з динамічним вимірюванням тиску у вимірюваній посудині, з використанням каліброваного сопла за допомогою еталонної посудини [22, 62, 49]; метод визначення об'єму посудини через зміну її об'єму з'єднанням з еталонною посудиною, у якому вимірюють тиск та температуру після встановлення їх сталого співвідношення [48]; спосіб визначення фактичної площини критичного перерізу отвору сопла, розроблено змішувач системи сумішоутворення й дана оцінка технічним рішенням щодо його конструкції, математична модель процесу генерації гомогенної газової суміші із заданим компонентним складом, дослідження перетікання компонентів газової суміші через змішувач [57, 20, 23]; проведено серію натурних експериментів з наповнення резервуару з високочастотним моніторингом тиску й температури наповнюваного газу, визначено вплив урахування теплообміну зі стінками резервуару на досліджувані параметри суміші, а саме; тиск, осереднену за об'ємом температуру газу, температуру в контрольній точці, масу компонента суміші [58, 90]; визначені особливості роботи генератора паливної суміші за методом отворів із критичним перерізом й наведені відповідні визначальні рівняння дозування компонент газовой суміші й часу наповнення резервуару для побудови системи керування з використанням цифрового близнюка процесу, проаналізовано існуючі методи й засоби побудови цифрових близнюків аналогічних досліджуваних системі [40, 24, 71]; аналітична модель методу генерації газової суміші на основі надкритичного витікання газів з посудин через калібровані отвори, запропоновано виконувати корекцію початкового тиску в посудинах [73],

аналіз існуючих методів й засобів побудови цифрових близнюків, визначені напрями досліджень [61, 18].

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися автором на всеукраїнських і міжнародних науково-технічних конференціях: всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні», (м. Харків, 2016 р.); міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки», (м. Харків, 2017 – 2020 рр.); міжнародна науково-технічна конференція «Нові технології в машинобудуванні», (с. Коблеве, м. Харків, 2019 р.); міжнародна науково-технічна конференція «Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering» (ICTM 2020), (м. Харків, 2020 р.); міжнародна конференція з передового машинобудування та енергетики «Advances in Mechanical and Power Engineering» (SAMPE 2021), (м. Харків, 2021 р.); міжнародна науково-практична конференція «Mathematical Modeling and Simulation of Systems» (MODS'2022), (м. Харків, 2022 р.).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 184 сторінки, з яких основного тексту 141 сторінка, у тому числі: 73 рисунки, 13 таблиць, список використаних джерел із 97 найменувань на 14 сторінках, додатки на 10 сторінках.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В основу дисертації покладено матеріали, що узагальнюють дослідження, виконані автором при реалізації держбюджетних тем Міністерства освіти і науки України: «Розробка автоматизованого комплексу для прецизійного термоімпульсного оброблення детонуючими газовими сумішами» (№ ДР 0117U002500); «Розробка технологій та технічних рішень для автоматизованих промислових установок прецизійної обробки деталей агрегатів ГТД детонуючими газовими сумішами» (№ ДР 0119U100943); «Розробка програмного та технічного забезпечення цифрових близнюків

процесів обробки деталей літальних апаратів детонуючими газовими сумішами» (№ ДР 0102U109601).

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено систему генерації багатокомпонентної газової суміші для процесів фізико-технічної обробки на базі вдосконаленого методу отворів із критичним перерізом, у якому компоненти суміші подають із попередньо наповнених до початкового тиску проміжних посудин, що передбачають регулювання об'єму. Ця система дає змогу отримувати газові суміші з відхиленням складу на рівні до 0,1 % за масою.

2. Розроблено методикку визначення характеристик системи генерації багатокомпонентної газової суміші, яка дозволяє отримати необхідні параметри для формулювання закону керування виконавчими елементами, що забезпечує необхідну точність дозування компонентів.

3. Запропоновано спосіб визначення об'єму посудини довільної форми, що може бути застосований для широкого кола задач, у яких використовується наповнення вимірюваних посудин газом з тиском, що забезпечує надкритичне витікання газу в атмосферу.

Результати роботи впроваджено на ТОВ «Науково-виробниче підприємство Пластар», ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» та використано в навчальному процесі кафедри технології виробництва літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», про що отримані відповідні акти. На запропонований спосіб генерації газової суміші отримано патент на винахід, що пройшов кваліфікаційну експертизу.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЗАДАЧ ПРИ ГЕНЕРАЦІЇ СУМІШЕЙ ГАЗІВ ДЛЯ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНОЇ ОБРОБКИ

1.1 Використання газових сумішей в процесах фізико-технічної обробки

1.1.1 Використання газових сумішей в процесах зварювання

Зварювання, безсумнівно, є одним із ключових технологічних процесів в промисловості та будівництві, де найраніше виникла потреба застосування газових сумішей заданого складу.

До настання 1990-х років розвиток ринку захисних газів для зварювальних процесів проходив шляхом заміни чистого вуглекислого газу на газові суміші – спочатку двухкомпонентних на основі аргону, потім із подальшим удосконаленням технологій зварювання трьох і чотирьохкомпонентні [7]. Серед широкого асортименту сумішей найбільш розповсюджені $Ar+CO_2$, $Ar+CO_2+O_2$, $Ar+O_2$. У залежності від зварюваних матеріалів у склад сумішей на основі аргону включення O_2 може бути від 0,5 % до 8 % та CO_2 від 3 % до 25 %. Використання газових сумішей значно зменшило кількість недоліків, що супроводжують зварювання у чистому CO_2 . Зокрема, це дозволило уникнути проблем розбризкування та набризкування електродного металу, поліпшити формування зварювального шва, зменшити споживання електродної проволочки на одиницю довжини шва, підвищити механічні властивості металу шва та збільшити його стійкість до виникнення та поширення хрупких руйнувань [7].

Основні переваги впровадження газових сумішей, які є важливим інструментом у широкому спектрі застосувань [7]:

- удосконалення характеристик якості зварювального шва (зниження пористості та неметалевих включень);

- зменшення зони термічного впливу, що, в свою чергу, мінімізує короблення конструкції;
- зменшення споживання електроенергії та використаних матеріалів на 10 – 15 %;
- ефективне використання сумішей у виробництві для виготовлення виробів, у яких до зварних швів пред'являють високі вимоги щільності та втомної міцності;
- істотне зменшення виділень твердої фракції зварювального аерозолю, а в ній зниження токсичних виділень марганцю та хрому;
- відсутність необхідності підігріву редуктора на балоні із вуглекислим газом;
- зниження втрат електродного металу на розбризкування на 70 – 80 %, зниження кількості прилипання бризок в області зварного шва і внаслідок цього скорочення трудомісткості щодо їх видалення до 95 %.

Застосування в якості захисного газу сумішей аргона з окислювальними газами O_2 і CO_2 дозволяє усунути багато технологічних недоліків, властивих процесу зварювання в чистому аргоні і вуглекислому газі, розширивши тим самим межі застосування механізованого зварювання електродом, що плавиться [7].

Способи зварювання та склад сумішей газів, які використовуються для зварювання різних матеріалів, наведені в табл.1.1. Зазначені в цій таблиці суміші газів мають ряд важливих зварювально-технологічних властивостей [32], які залежать, як від способу зварювання і матеріалів, які зварюються, так і від їх компонентного складу та концентрації компоненту (наприклад при зварюванні марганцеві низьколегованих дрібнозернистих сталей підвищеної міцності та хромонікелевих сталей відсотковий вміст компоненту O_2 складає 0,5 %).

Таблиця 1.1 – Способи зварювання і склад сумішей захисних газів, які використовуються для зварювання різних матеріалів

Відсотковий склад у суміші, %						спосіб зварювання	Матеріал, який зварюється
Ar	He	CO ₂	O ₂	H ₂	N ₂		
70	30	-	-	-	-	TIG	Алюміній та інші кольорові метали, низько- та високолеговані хромонікелеві сталі
96...98	-	-	2...4	-	-	MAG	Низько- та високолеговані хромонікелеві сталі
90...92	-	-	8...10	-	-	MAG	Вуглецеві та низьколеговані сталі
97...98	-	2...3	-	-	-	MAG	Леговані та високолеговані сталі
75...90	-	10...25	-	-	-		Вуглецеві та низьколеговані сталі
90...95	-	-	-	5...10	-	MIG	Високолеговані хромонікелеві сталі
85...90	-	-	-	-	10...15	MIG	Мідь та мідні сплави
50...69	30...45	-	1...5	-	-	MAG	Високолеговані хромонікелеві сталі
55...67	30...40	3...5	-	-	-	MAG	Високолеговані хромонікелеві сталі підвищеної міцності
70...87	-	10...25	3...5	-	-	MAG	Вуглецеві та низьколеговані сталі
65	25	-	-	10	-	MAG	Високолеговані корозійностійкі хромонікелеві сталі
60	30	-	-	-	10	MIG	Мідь та мідні сплави
76	20	3	-	1	-	MAG	Високолеговані корозійностійкі хромонікелеві сталі
65	26,5	8	0,5	-	-	MAG	Марганцеві низьколеговані дрібнозернисті сталі підвищеної міцності та хромонікелеві сталі

1.1.2 Використання газових сумішей в іонно-плазмових технологіях

Одним із основних завдань для збільшення ресурсу роботи елементів машин і механізмів є підвищення їх надійності. Для досягнення високої якості і надійності деталей вузлів тертя, деталей які працюють при підвищених температурах використовуються захисні покриття і формування зміцнених поверхневих шарів. Товщина таких шарів може бути від десятків мікрометрів до кількох міліметрів. Ресурс залежить від якісних показників покриття: відсутність пор, інших включень, хімічна однорідність та ін. [6, 38].

Іонно-плазмове травлення та нанесення покриттів є процесами, які використовують іони та плазму для зміни поверхневих властивостей матеріалів.

Газові суміші різного складу широко застосовують у іонно-плазмових технологіях. Наприклад кисень O_2 сприяє підвищенню селективності травлення, інертні гази ($Ar + He$) стабілізують плазму [44]. Для досягнення певних якостей плазми при травленні $SiCOH$ використовують добавки Ar , O_2 , C_4F_8 , H_2 , N_2 та CO [85]. Для створення покриттів складного складу використовують газові суміші: N_2+CH_4 – для нанесення оптичних покриттів, $N_2+C_2H_2$ – для отримання карбонітридів титану, H_2S+N_2 – для отримання покриттів із мастилом, N_2+Ar – для підвищення мікротвердості конденсатів системи $Ti-Si-N$ [94].

Плазма низького тиску, заснована на C_4F_8 , широко використовується у виробництві напівпровідників, таких як осадження додаванням кисню O_2 до плазми або травлення додаванням азоту N [95]. При іонно-плазмовому травленні полі(хлор-п-ксилілен) (парилен C) використовують суміш аргону (Ar) і кисню (O_2) [96].

Кожен компонент газової суміші має відчутний вплив на властивості плазми, кінетику реакцій та хімічні процеси, які відбуваються на поверхні оброблюваного матеріалу. Це відкриває широкі можливості для контролювання цих реакцій з метою досягнення бажаних властивостей

поверхні. Проте, навіть при значних досягненнях в галузі іонно-плазмових технологіях, дослідження впливу компонентів газових сумішей на ці процеси все ще є актуальними особливо щодо кількості компонентів, їх витрати, концентрацій та похибки їх співвідношення. Це пояснюється появою нових вимог до поверхні матеріалів, та необхідністю досягнення бажаних властивостей поверхневого шару [6, 38, 44, 85, 94, 95, 96, 84].

1.1.3 Використання газових сумішей в детонаційних процесах

В устаткуванні, в якому використовуються детонувальні газові суміші зазвичай використовують двухкомпонентні газові суміші з палива та окиснювача. В якості палива використовують метан CH_4 , пропан, пропан-бутан C_3H_8 , водень H_2 . Окиснювач – кисень O_2 або повітря. Відомі також випадки використання трикомпонентних паливних сумішей з додаванням інертних газів (аргону, гелію і ін.), для запобігання утворенню оксидів, наприклад, при обробленні деталей з титанових сплавів. Суміші на основі ацетилену не використовуються із-за високої вибухонебезпеки, пов'язаної з їх вживанням [41].

Для формулювання вимог щодо точності дозування компонентів газової суміші за проведеними числовими експериментами [36] проаналізовано вплив надлишку палива на теплові потоки, які виникають при термоімпульсній обробці.

У числових експериментах використовували модель горіння й теплообміну в камері термоімпульсного устаткування [16]. Розрахунки проводилися для випадків горіння рівномірних по компонентному складу сумішей метану та пропану з киснем й зміною масової концентрації палива, що коливалася в межах $\pm 5\%$ від стехіометричного співвідношення. В результатах моделювання, така зміна масової концентрації палива від стехіометричного співвідношення призводить до суттєвих змін значення осередненого питомого теплового потоку та часу його дії (при 5% надлишку CH_4 час угамування ударних хвиль зменшився на 40%) [36].

Загальна кількість тепла Q , поглинутого одиницею поверхні деталі протягом періоду затухання ударних хвиль, досягає найвищих значень при стехіометричному складі паливної суміші. Зміна масової концентрації CH_4 на $\pm 5\%$ призводить до зменшення цього значення від $31,3\%$ (з надлишком окислювача) до $41,2\%$ (з надлишком палива). У випадку суміші $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{O}_2$ спостерігається аналогічна залежність між сукупною кількістю поглинутого тепла та коефіцієнтом надлишку палива (рис. 1.1) [36].

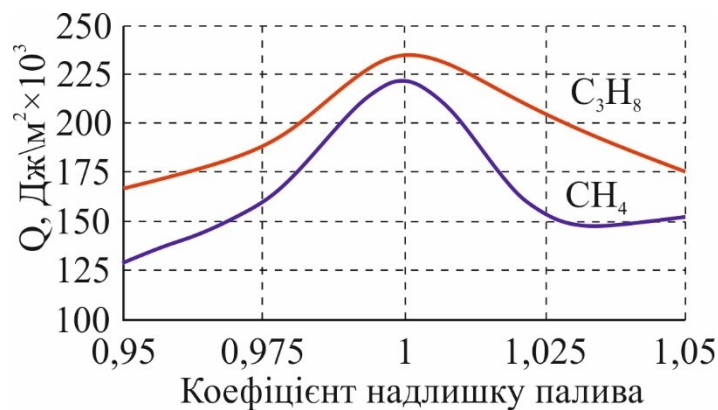


Рисунок 1.1 – Кількість тепла, поглиненого площею одиничного елемента поверхні деталі за час угамування ударних хвиль

1.2 Вимоги до точності дозування компонент

1.2.1 Вплив концентрації компонента газу на процес зварювання

Вимоги до газових сумішей при зварюванні залежать від типу зварювання, матеріалу, який зварюється, та специфічних умов процесу. Основні вимоги можуть включати захист від окислювання, атмосферних газів, забезпечення стабільності дуги, температури в шві, якості і продуктивності зварювання.

Необхідність дослідження впливу компонентів газових сумішей на процеси зварювання залишається актуальною, навіть при значних досягненнях в цій галузі. Це пояснюється тим, що з появою нових матеріалів виникає потреба у нових підходах до підвищення якості зварних швів. Одним із

аспектів дослідження є вплив концентрації газів у деяких окремих випадках. Через різні хімічні властивості газів, їхні концентрації можуть мати суттєвий вплив на процес зварювання. Наприклад, при зварюванні МАГ бризки є надзвичайно великою проблемою, на їх кількість сильно впливає склад використовуваного захисного газу. На рис. 1.2 показано кількість утворення бризок при Ar-CO_2 та Ar-O_2 газових сумішах, що використовуються при зварюванні МАГ [93].

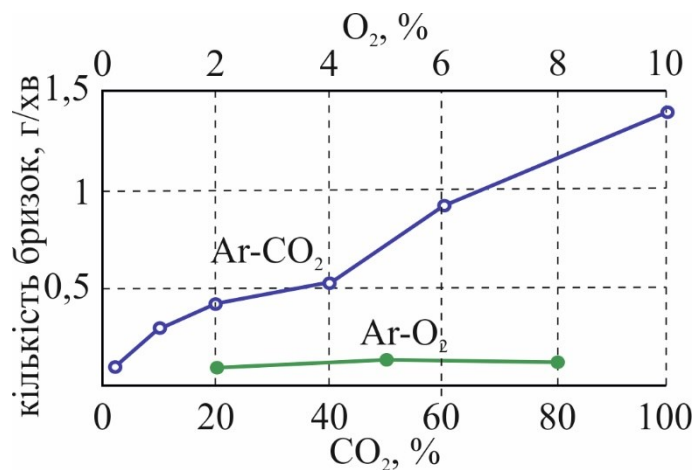


Рисунок 1.2 – Вплив захисного газу на утворення бризок [93]

На рис. 1.3 показано вплив збільшення концентрації азоту на пікову температуру в зварному шві на відстані 2 мм від лінії плавлення [97].

Залежність залишкового напруження при ГТА зварюванні від кількості додавання азоту до захисного газу [97] показано на рис. 1.4.

З графіків видно, що для деяких випадків незначна зміна складу у 0,5 % відхилення концентрації газової суміші істотно впливає на параметри процесу зварювання і якість зварного шву. Допуски щодо газових сумішей для компонентів, об'ємна частка яких у суміші складає до 5 %, допустимі відхилення від установленної величини становлять $\pm 0,5$ % об'ємної частки у відсотках. Для компонентів, об'ємна частка яких у суміші складає від 5 % до 50 %, допустимий відхил становить ± 10 % установленної величини [12].

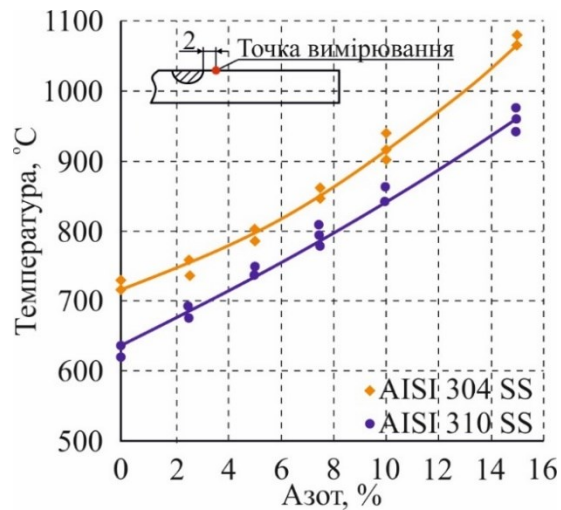


Рисунок 1.3 – Вплив додавання газоподібного азоту до захисного газу на пікову температуру в зварному шві на відстані 2 мм від лінії плавлення [97]

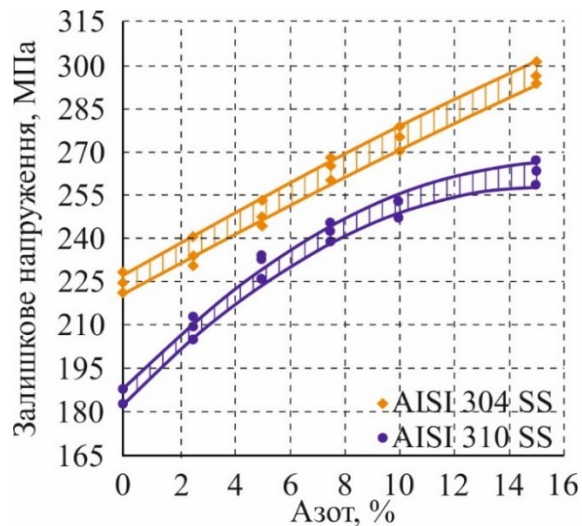


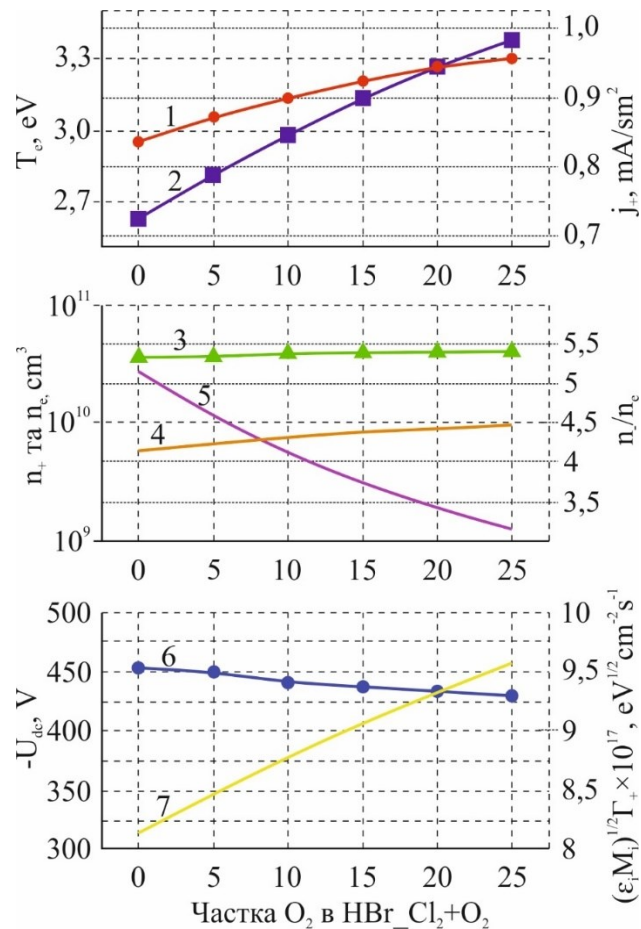
Рисунок 1.4 – Залежність залишкового напруження при ГТА зварюванні від кількості додавання азоту до захисного газу [97]

1.2.2 Вплив концентрації компонента газу на параметри плазми

Основні фактори, які важливо враховувати під час вибору газових сумішей у іонно-плазмових технологіях, включають різні аспекти. По-перше, чистота газів є ключовим критерієм, оскільки вони повинні бути піддані високоякісному очищенню від різноманітних домішок, таких як волога, органічні сполуки, пилові частинки та інші забруднення. Наявність таких домішок може негативно вплинути на якість процесу і вироблених

матеріалів [46].

Другим важливим аспектом є склад газової суміші, який визначається згідно з вимогами конкретного процесу. Наприклад, у випадку плазмового нанесення плівок можуть використовуватися газові суміші, що містять органічні сполуки для формування плівки [45]. Вибір складу газової суміші має вирішальне значення для досягнення бажаного результату та ефективності процесу. Крім того, енергія плазми є важливим фактором у ряді випадків при виборі газової суміші (рис. 1.5). Концентрація газів у суміші має істотний вплив



- 1 – температура електронів; 2 – густина іонного струму; 3 – повна густина позитивних іонів; 4 – електронна густина; 5 – відносна густина іонів;
6 – зміщення постійного струму; 7 – потік енергії іонів

Рисунок 1.5 – Виміряні (лінії + символи) та модельно-прогнозовані (лінії) параметри плазми залежно від вмісту O_2 у $50\% Cl_2 + HBr + O_2$ газовій суміші (умови обробки: $P = 0.0013332237$ kPa, $W = 500$ W і $W_{dc} = 200$ W) [91]

на плазмові характеристики, такі як, температура, густина іонного струму, повна густина позитивних іонів, електронна густина, відносна негативна густина іонів, негативне зміщення постійного струму, потік енергії іонів [91].

Третім важливим аспектом при роботі з іонно-плазмовими технологіями є контроль тиску та потоку газу. Забезпечення оптимальних умов роботи плазмового процесу передбачає належне регулювання тиску та потоку газів. Параметри цих факторів можуть варіюватися залежно від особливостей конкретної технології, і належна настройка їх є вирішальною для досягнення поставлених цілей. Наприклад тиск азоту в камері визначає його кількість у отриманому покритті [46, 44].

1.2.3 Вимоги до суміші для прецизійної термоімпульсної обробки

Для оцінки впливу співвідношення компонентів газової суміші на кваліметричний показник кромки було проведено моделювання оплавлення мікро-задирок на поверхні деталі. Об'єктом дослідження була кромка алюмінієвої деталі з мікро-задиркою довжиною $l = 0,5$ мм та товщиною $\delta = 0,1$ мм. Шляхом розрахунків було отримано серію кривих, що ілюструють залежність показника кромки (a) від часу дії теплового потоку (t) за фіксованого значення усередненого за часом теплового потоку (q). Отримані криві були піддані процедурі інтерполяції для забезпечення рівномірності інтервалів часу [15].

Серія отриманих кривих була представлена у вигляді каркасної поверхні в просторі $a-t-q$, і на основі цього каркасу застосовувалась метод сплайн-інтерполяції для побудови поверхні режимів (рис. 1.6). Кожна точка на цій поверхні відповідає певному значенню радіуса закруглення для визначеного усередненого за часом питомого теплового потоку та часу оброблення.

З метою встановлення вимог щодо точності забезпечення компонентного складу згідно з вказаною величиною кваліметричного показника кромки a , побудовані перерізи поверхні режимів

термоімпульсного оброблення за допомогою фіксованої площини
 $t = const$.

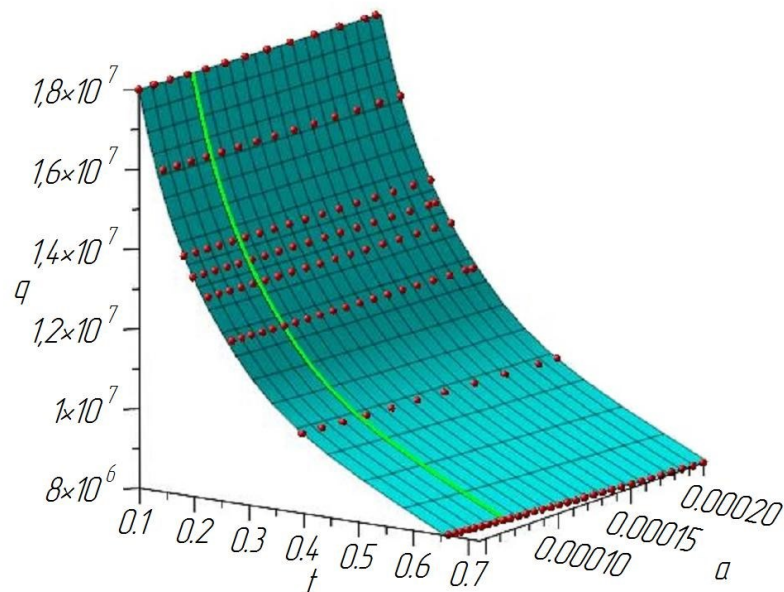


Рисунок 1.6 – Поверхня режимів термоімпульсної обробки кромки

У результаті детального аналізу отриманих кривих було встановлено, що навіть незначні зміни у величині усередненого питомого теплового потоку на рівень 1 % мають вплив на похибку радіуса закруглення кромки a , яка становить приблизно $\pm 0,05$ мм. Ураховуючи вплив похибок компонентного складу суміші на величину теплового потоку, а також вимоги стандарту якості кромки [60, 86] для кромки типу E2 (гострих), необхідна точність дозування компонентів суміші наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Вимоги щодо точності забезпечення компонентного складу суміші для кромки типу E2, матеріал - алюміній

Допустимі відхилення форми кромки, мм		Допустимі похибки компонентного складу, %	
клас А	клас В	клас А	клас В
+0,03	+0,20	0,1	0,5

Для кромок типу E3 припустима похибка теплового потоку та компонентного складу може бути удвічі більшою, ніж для кромок типу E2. Це надає підстави припускати, що область застосування термоімпульсного оброблення може включати обробку кромок типу E2 та E3. З обробленням більш гострих кромок типів E0 та E1 зі стабільною якістю пов'язана необхідність генерації паливної суміші з точністю приблизно 0,01 %. Однак, це виходить за межі сучасних можливостей промислового обладнання і технологій [26].

Таким чином, ряд сучасних процесів фізико-технічної обробки вимагає використання багатокомпонентних газових сумішей з точністю дозування компонент за масою на рівні до 0,1 %.

1.3 Сучасні методи генерації газових сумішей

Існуючі генератори газових сумішей за точністю співвідношення компонентів у суміші можна розділити на прецизійні та промислові. Перші служать для створення порівняно невеликих обсягів перевірочних газових сумішей, застосовуваних у процесі забезпечення метрології в різноманітних виробництвах. Тому наступний аналіз не включатиме такі методи: дифузійний, насичення, мембранний та електрохімічний, які застосовуються для генерації сумішей із надмалою концентрацією компонентів.

Промислові методи, маючи меншу точність змішування, характеризуються вищою продуктивністю [70]. Існуює два класи такого роду методів: статичні та динамічні (табл. 1.3).

При використанні статичних методів змішування кількість різних газів вимірюється об'ємно, гравіметрично чи манометрично. Такі способи часто застосовуються в лабораторних умовах, коли необхідні невеликі партії газових сумішей для проведення експериментів, а також використовуються у великих масштабах комерційними постачальниками газових сумішей.

Таблиця 1.3 – Промислові методи змішування газів

Статичні	Динамічні
Об'ємний Гравіметричний Манометричний	Поршневих насосів Періодичної інжекції Безперервної інжекції Критичних отворів Термічних витратомірів

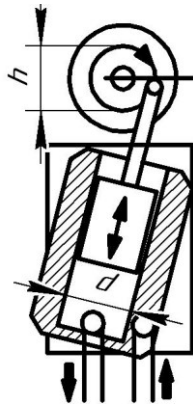
В роботах Ю. О. Сисоева [70, 94] були представлені поліпшені манометричні методи генерації сумішей високого тиску, які дозволяють досягти точності дозування компонента 0,1 %. Зокрема, було запропоновано замінити вакуумування ємності циклічною продувкою основним газом та для виключення похибок використовувати керовані пропорційні клапани, які пов'язані зі спрацьовуванням відсічних клапанів коли досягнуто заданий тиск. Що в свою чергу забезпечило можливість згенерувати суміш з тиском 1,0 МПа в ємності об'ємом 10 л впродовж 3 хв. Також цей спосіб неможливий для камер зі змінною температурою стінок, що властиво у випадку термоімпульсного оброблення.

Динамічні газозмішувальні методи використовуються у разі необхідності частого коригування складу потоку газової суміші або коли газова суміш нестабільна.

Найбільш поширений метод, який використовується для отримання потоку газу відомої швидкості, включає калібрований витратомір та відкалібрований клапан управління потоком. Однак, існують методи, в яких не застосовуються витратоміри.

Зазначене в ISO 6145-2 [76] функціонування динамічного методу генерації газової суміші базується на використанні робочого об'єму поршневих насосів, які передають окремі частини газу, неперервно комбінуючи їх та забезпечуючи гомогенізацію для отримання необхідного газового складу (рис. 1.7). Кожен компонент газової суміші за допомогою

поршневого насоса подається окремо, на виході із мірних циліндрів відбувається перемішування компонентів. Один насос за допомогою синхронного двигуна качає з постійною швидкістю, а пропорційна швидкість руху іншого забезпечується зубчастими колесами. Відсотковий склад компоненту в суміші регулюється заміною зубчастих коліс. Швидкість генерації суміші при описаному способі варіюються в межах 5 л/год – 500 л/год в залежності від обладнання, що використовується.



d – діаметр циліндра; h – висота ходу поршня

Рисунок 1.7 – Схема поршневого насоса [76]

Об'ємна частка певного компонента в отриманій газовій суміші приблизно дорівнює обсягу цього компонента, поділеної на загальний об'єм всіх компонентів, як показано в формулі (1.1) [76]:

$$\varphi_i \approx \frac{N_i V_{geo,i}}{\sum N_k V_{geo,k}}, \quad (1.1)$$

де φ_i – об'ємна частка i -го компонента в умовах експлуатації поршневих насосів.

Цей метод забезпечує задану точність складу суміші з гарантованою повторюваністю за умов [76]:

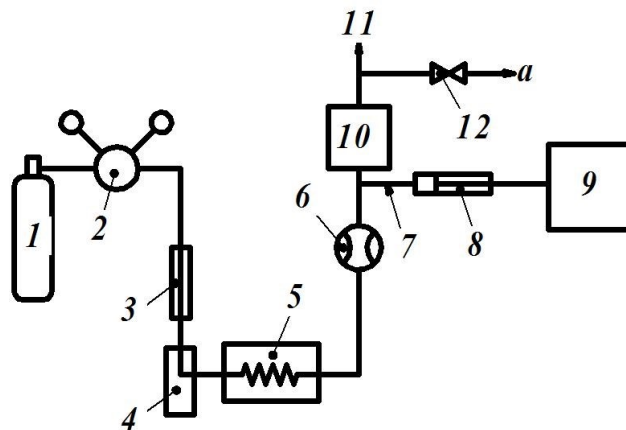
- а) попереднього запуску двигуна не менше ніж на 30 хв, це дозволяє досягти теплової рівноваги та подолати десорбцію чи розчинення газу;
- б) відкидання різниць тисків, що становлять більш ніж 0,2 кПа серед

двох вхідних або 1 кПа серед вхідних та випускних каналів.

Зазначений метод застосовується лише із газоподібними сумішами чи повністю випареними компонентами, включно з агресивними газами, якщо складові не реагують між собою або зі змащеними поверхнями насоса [76].

У термоенергетичному устаткуванні компанії BOSCH використовується поршневий метод сумішоутворення, проте такий пристрій важко визнати універсальним з точки зору зміни палива. Для того, щоб забезпечити стехіометричний склад суміші необхідно замінити циліндри-дозатори [92].

Генерація газової суміші методом *безперервної інжекції* полягає у наступному. Компонент газу, в газовій або рідкій фазі, виштовхується в потік основного газу через капіляр у вигляді шприця з голкою або плунжера, який неперервно приводиться в рух двигуном з регульованою швидкістю (рис. 1.8) [77].



- 1 – балон, заповнений стиснутим газом, що додається;
 2 – двоступінчастий редуктор регулювання тиску; 3 – фільтр; 4 – зволожувач
 (при необхідності); 5 – теплообмінник термостата; 6 – витратомір;
 7 – капіляр, що дозує; 8 – шприц; 9 – приводний механізм шприца;
 10 – камера для змішування; 11 – газ калібрувальний;
 12 – запірний кран продувки; а – отвір для продувки

Рисунок 1.8 – Схема пристрою для виробництва бінарних газових повірочних сумішей за допомогою безперервної інжекції шприцем [77]

Метод безперервної інжекції має такі переваги: можливість безперервної підготовки суттєвої кількості газової суміші та реалізація

отримання багатокомпонентних сумішей так само, як бінарні використовуючи відповідну кількість шприців, або через один шприц заздалегіть підготовленої багатокомпонентної суміші необхідного складу. Так само забезпечується калібрування суміші застосовуючи збільшення частки компонента малими дозами [77].

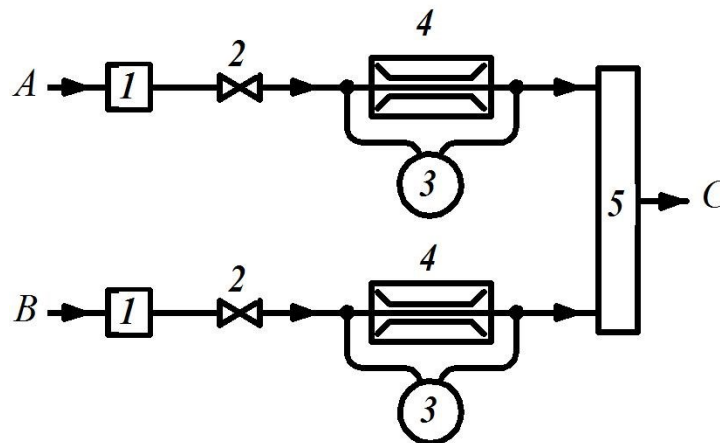
Об'ємна частка калібрувального компонента в суміші з додатковим газом визначається рівнянням:

$$\varphi_A = \frac{q_A}{(q_A + q_B)}, \quad (1.2)$$

де q_A – об'ємна витрата компонента калібрування A ; q_B – об'ємна витрата газу, який додається B .

У *капілярному методі* [78] сумішоутворення компонент газу подається через капілярну трубку при забезпеченні постійного перепаду тиску в потоці допоміжного газу швидкість якого контролюється (рис. 1.9).

Якщо необхідно отримати низький вміст компонента тоді отримана газова суміш додатково розбавляється через інший капіляр.



1 – двоступінчастий редуктор (регулятор тиску); 2 – клапан регулювання високої точності; 3 – диференціальний манометр вимірювання тиску;

4 – трубка капілярна; 5 – камера для змішування;

A – основний газ; B – додатковий газ; C – суміш газів

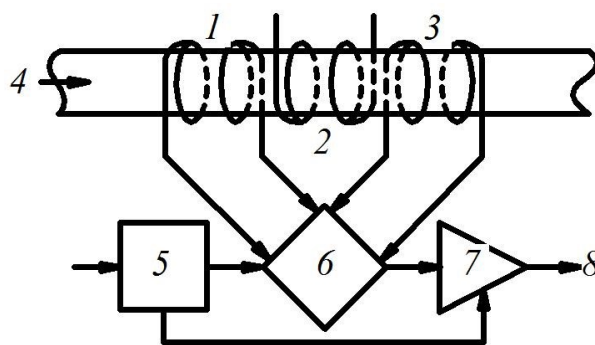
Рисунок 1.9 – Схема капілярного методу для отримання двокомпонентної суміші газів [78]

Об'ємна витрата газу q_A , що виходить з капіляра A наближено визначається як:

$$q_A = \frac{\pi r^4 (p_1 - p_2)}{8\eta L}, \quad (1.3)$$

де r – радіус трубки капілярної; p_1 – тиск на вході до капіляра; p_2 – тиск на виході з капіляра; η – динамічна в'язкість газу за температури використання; L – довжина капілярної трубки.

Метод *термічних витратомірів* (рис. 1.10), передбачає використання термічних регуляторів масової витрати і дозволяє контролювати швидкість потоку одного або кількох газоподібних компонентів. Датчик потоку кількості тепла визначає різницю температур до і після проходження газового потоку через електрично нагріту нитку. Детектори на вході та виході утворюють частину мосту Уїтстона, генерують сигнал, який після посилення та лінеаризації, вказує на масову витрату і використовується для роботи електричного регулюючого клапана. Коли контролер потоку кількості тепла відкалібрований для одного газу, калібрування для іншого газу обчислюється за його теплоємністю при сталому тиску [80].



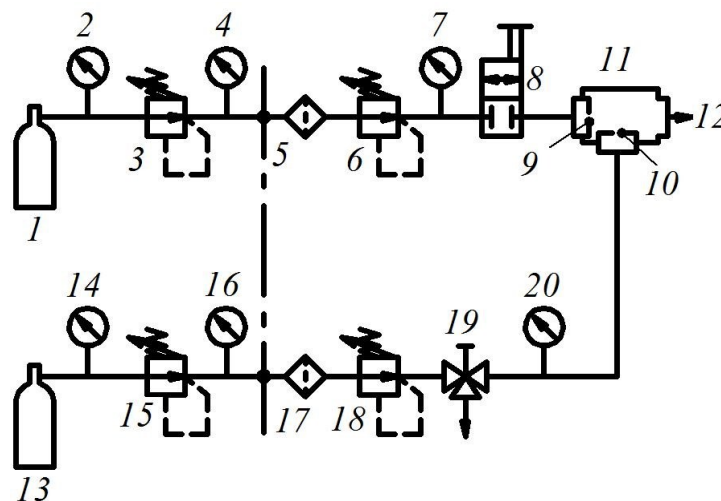
1, 2 – датчики температури; 3 – нагрівальний елемент; 4 – подача газу;
5 – електричне живлення; 6 - міст Уїтстона; 7 – диференціальний підсилювач;
8 – вихідний електричний сигнал

Рисунок 1.10 – Схема роботи регулятора теплового масового потоку [80]

Перевагою цього методу є можливість постійного отримання великої кількості газової суміші.

Системи змішування газів, основані на регуляторах теплової масової витрати, включаючи комп'ютеризацію та автоматизацію управління, є комерційно доступними. До прикладу, компанією Kennametal Inc. (США) пропонується система генерації газової суміші для термо-енергетичних установок із регулюванням тиску на базі цифрових контролерів.

Розглянемо роботу системи газового змішування, яка використовує **метод критичних отворів** (рис. 1.11), і полягає у наступному [79].



- 1 – балон під тиском (комплементарний газ); 2, 4, 7, 14, 16, 20 – манометри;
 3, 15 – редукційні клапани; 5, 17 – фільтри; 6, 18 – регулятори тиску;
 8 – запірний клапан; 9 – отвір подачі комплементарного газу;
 10 – отвір подачі калібрувального компонента; 11 – система отворів;
 12 – вихід для суміші калібрувального газу; 13 – балон під тиском
 (калібрувальний компонент); 19 – вентиляційний клапан

Рисунок 1.11 – Схема пристрою приготування бінарних газових сумішей оснований на методі критичних отворів [79]

Клапани газових балонів 1, 13, які містять додатковий газ та інші газові компоненти, підключені до змішувальної системи за допомогою

редукторів 3, 15 та металевих фільтрів 5, 17, відкриваються. Показники на манометрах 4, 16 приблизно на 200 кПа (2 бар) вищі, ніж очікувані значення на манометрах 7, 20 відповідно, налаштовані. Регулятори тиску 6, 18 відкриті. Закриттям запірного клапана 8 переривається потік додаткового газу, а потім, шляхом кількоразового відкриття та закриття, компонентом калібрування протирається. Потім клапан 19 закривається, і за допомогою регулятора тиску 18 на манометрі 20 встановлюється необхідний тиск для отримання потрібної витрати. На виході змішувальної камери 12 із системою отворів 11 швидкість потоку вимірюється одним із методів, описаних у ISO 6145-1 [75]. Далі запірний клапан 8 відкривається, і встановлюється за допомогою регулятора 6 необхідний тиск контролюючи його на манометрі 7 для отримання потрібної витрати.

Проходячи через критичний отвір зі збільшенням вхідного тиску спостерігається зростання об'ємної витрати газу. Коли відношення вхідного тиску газу P_1 до тиску газу на виході з отвору P_2 досягає критичного значення, подальше збільшення P_1 не впливає на об'ємну витрату газу, яка стає незалежною від P_2 . Для успішного застосування цього методу змішування газів, компоненти повинні бути повністю чистими від будь-яких твердих чи рідких домішок [79].

Критичне відношення тисків за постійної температури становить [79]:

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{crit} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}, \quad (1.4)$$

де γ – відношення молярних теплоємностей газу за умови постійних тиску та об'єму.

1.4 Застосування методу критичних отворів для динамічного генерування газових сумішей

Метод критичних отворів є одним із найбільш точних серед динамічних методів генерації сумішей. (табл. 1.4) [79, 75, 21, 25]. Метод критичних отворів

є методом, який забезпечує найвищу продуктивність генерації суміші в широкому діапазоні концентрації та з досить малим відхиленням співвідношення компонентів. У базовому варіанті метод забезпечує похибку дозування компонентів на рівні 0,5 % [21].

Таблиця 1.4 – Можливості динамічних методів підготовки газових сумішей

Метод підготовки	Об'ємна частка 2-го газу	Відносна похибка, %
Об'ємних насосів	$10^{-4} - 1$	0,5
Безперервної інжекції	$10^{-5} - 10^{-2}$	5,0
Капілярний	$10^{-5} - 1$	1,0
Термічних	$10^{-9} - 1$	1,0
Критичних отворів	$10^{-4} - 1$	0,5

Одна з головних переваг використання методу критичних отворів полягає у можливості готувати складні багатоконпонентні газові суміші, подібно до двокомпонентних сумішей, шляхом використання відповідної кількості отворів. Крім того, цей метод дозволяє забезпечувати постійне виробництво великих обсягів газових сумішей. Розмаїття швидкостей потоку може знаходитись в широкому діапазоні, починаючи від декількох мілілітрів і досягаючи десятків літрів на хвилину [15, 79].

Витрата газу через отвір залежить від вхідного тиску та температури в самому отворі. Цей факт ставить специфічні вимоги до якості використовуваних редуційних клапанів та регуляторів тиску з метою підтримки сталого вхідного тиску. Малі зміни температури викликають незначні зміни співвідношення швидкостей потоку, при умові, що температура є однаковою на кожному отворі. Залежно від геометрії сопла та напрямку потоку через отвір, залежність швидкості потоку від тиску, може варіюватись. Для досягнення високої точності необхідне калібрування.

Незважаючи на зазначні переваги, для застосування методу критичних отворів в перспективних фізико-технічних процесах його точність необхідно

підвищувати до показників принаймні у 0,1 % похибки дозування компонент за масою.

Висновки до розділу 1, постановка мети і завдань дослідження

1. В сучасних методах фізико-технічної обробки широко застосовуються різноманітні багатокомпонентні газові суміші. Точність компонентного складу таких сумішей суттєво впливає на властивості оброблюваних матеріалів та стабільність технологічних режимів оброблення.

2. Сучасні промислові методи генерації багатокомпонентних газових сумішей неповною мірою відповідають потребам перспективних процесів фізико-технічної обробки і потребують удосконалення як з точки зору точності дозування компонент, так і з точки зору їх продуктивності.

3. Метод критичних отворів є одним з найпродуктивніших серед сучасних методів генерації багатокомпонентних газових сумішей, але його базовий варіант забезпечує точність дозування компонентів на рівні 0,5 %, що є недостатнім для ряду перспективних процесів фізико-технічної обробки. Для його використання в таких процесах точність методу має бути підвищена до показників похибки дозування компонент принаймні до рівня 0,1 %.

4. При використанні методу критичних отворів важливо враховувати ряд факторів, які не можуть бути точно задані заздалегідь, але впливають на похибку дозування компонентів. Для їх визначення необхідна розробка теоретичних методів та експериментальних методик, які б забезпечували заданий рівень точності компонентного складу суміші.

У зв'язку з виконаними дослідженнями по аналізу робіт даного напрямку була визначена мета роботи – розробка методу генерації газових сумішей для процесів фізико-технічної обробки на основі динамічного методу отворів із критичним перерізом.

Для досягнення поставленої в роботі мети, необхідно вирішити наступні завдання.

1. Розробити конструктивні та технічні рішення для підвищення точності динамічного методу критичних отворів отримання газових сумішей.

2. Розробити модель для визначення технологічних параметрів при застосуванні запропонованого методу та провести аналіз можливості застосування прийнятих технічних рішень.

3. Розробити методики для визначення характеристик елементів системи генерації газових сумішей на основі розроблюваного методу, які б забезпечували заданий рівень точності компонентного складу суміші.

4. Розробити прецизійний генератор газових сумішей на основі запропонованих технічних рішень.

Основні наукові результати, наведені в першому розділі, опубліковано в роботах автора [21, 25, 26, 41].

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ВДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КРИТИЧНИХ ОТВОРІВ

2.1 Розробка технічних рішень для підвищення точності методу критичних отворів

У праці [31], сформульовано наступні напрями вдосконалення системи сумішоутворення для термоімпульсного обладнання:

- забезпечення точності дозування компонента
- забезпечення гомогенності газової суміші;
- забезпечення універсальності у використанні типів палива;
- автоматична корекція роботи відповідно до змін зовнішніх умов (зазвичай температур);
- підвищення рівня точності вимірювання параметрів, що керують процесом;
- забезпечення безпечної роботи системи генерації газової суміші.

Один з важливих методів створення газових сумішей [75], що виділяється серед інших динамічних підходів, – це метод критичних отворів. Основна ідея полягає в тому, що коли газ протікає через спеціально калібрований отвір та перевищує критичний перепад тиску, об'ємний потік газу стабілізується. Це досягається завдяки тому, що швидкість витікання газу досягає місцевої швидкості звуку [79]. Цей метод дозволяє досягти необхідного відношення компонентів у газовій суміші за рахунок контрольованого діаметра критичних отворів.

Однак, при використанні цього методу в контексті термоімпульсного оброблення [54] з'являється нове завдання через наявність у робочій камері деталей складної геометрії. Саме це ускладнює процес, коли маємо справу з елементами, що включають внутрішні порожнини та канали складної форми, наприклад, корпусні деталі літальних апаратів. Тому, окрім досягнення точності дозування компонентів, стає важливим забезпечити однорідний

склад паливної суміші, що становить новий виклик порівняно з іншими завданнями генерації газових сумішей.

Під час динамічної генерації газових сумішей у вакуумних камерах плазмових установок, автоматично забезпечується умова критичного перепаду тиску між газовими магістралями та робочою камерою установки. Таким чином, у будь-якому з відомих методів, деякі перерізи магістралей автоматично задовольняють умови критичного витікання. Зокрема, метод критичних отворів є серед найточніших у динамічних методах генерації сумішей. В його базовій формі досягається точність дозування компонентів на рівні 0,5 %. Тому вибір цього методу для генерації газових сумішей у плазмових технологіях є зрозумілим та обґрунтованим рішенням, і спроби впровадження такого підходу були здійснені ще в 90-х роках минулого століття [70].

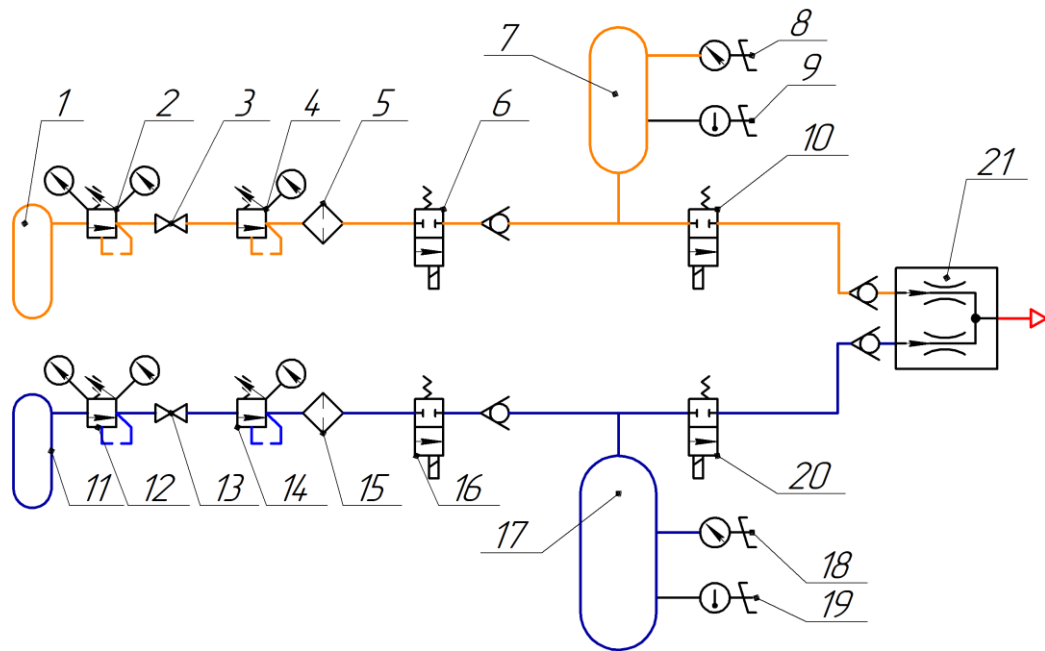
У основному варіанті методу, стійкість співвідношення компонентів досягається шляхом збереження рівності тисків та температур перед критичними отворами. Проте, забезпечення цих умов може виявитися важким завданням. Для кращого розуміння розглянемо приклад типової схеми пристрою для отримання суміші з використанням методу критичних отворів (рис. 1.11), який описаний у стандарті ISO 6145-6 [79].

Розглянутий метод динамічної генерації газових сумішей в плазмових установках передбачає використання двох редукторів (3 та 15) та пари регуляторів тиску (6 та 18). Контроль тиску перед критичними отворами виконується завдяки манометрам (7 та 20). Важливо зауважити, що всі ці компоненти можуть мати власні похибки, а також час відгуку регуляторів на зміни тиску супроводжується певним запізненням, яке може різнитися. До цього, різниця в гідравлічному опорі між лініями 5 – 6, 6 – 7, 7 – 8 та 17 – 18, 18 – 19, 19 – 20 обумовлена присутністю різних пристроїв, таких як запірний клапан 8 та вентиляційний клапан 19. Це призводить до різних опорів та, можливо, впливає на характеристики газів після проходження регуляторів тиску, що може вплинути на їхню температуру та місцеву швидкість звуку.

Для досягнення більшої точності методу традиційно використовуються такі підходи, як калібрування манометрів та критичних отворів, покращення точності регуляторів і використання додаткових стабілізаторів температури газів [72, 68]. Дослідження, викладені у роботі [83] демонструють, що якщо відмовитися від точності дозування кількості суміші і зосередитися на досягненні точності відношення компонентів, можна здійснити калібрування критичних отворів, що призведе до збільшення точності методу до рівня 0,1 %. Однак цей підхід майже вичерповує можливості подальшого підвищення точності за допомогою цих методів. Суттєве вдосконалення методу критичних отворів можливе лише застосуванням нових технічних рішень, оскільки наявні резерви для подальшого підвищення точності вже практично вичерпані.

Пропоноване рішення актуальне у випадку, коли необхідно періодично заповнювати робочу камеру певною сумішшю компонентів з певними співвідношеннями. У цьому випадку можна відмовитись від необхідності підтримувати постійні значення тиску та температури перед критичними отворами. Замість цього, достатньо забезпечити такі значення цих параметрів, які забезпечать потрібне співвідношення масових концентрацій компонентів. Це може бути досягнуто найпростіше через впровадження в лінії подачі газів проміжних ємностей із регульованим об'ємом, як показано на рис. 2.1.

У зазначеному підході після наповнення ємностей та досягнення заданого рівня тиску подача до них припиняється. Фактично, процес генерації суміші відбувається лише після того, як клапани 10 та 20 відкриваються, дозволяючи газам вільно змішуватися в змішувачі з критичними отворами 21. Під час цього процесу гази безперешкодно переміщуються з ємностей 7 та 17 без застосування додаткових регулювальних пристроїв. Забезпечення точності дозування компонентів у суміші досягається через вибір площ критичних отворів, об'ємів ємностей та початкових тисків та температур у них [50].

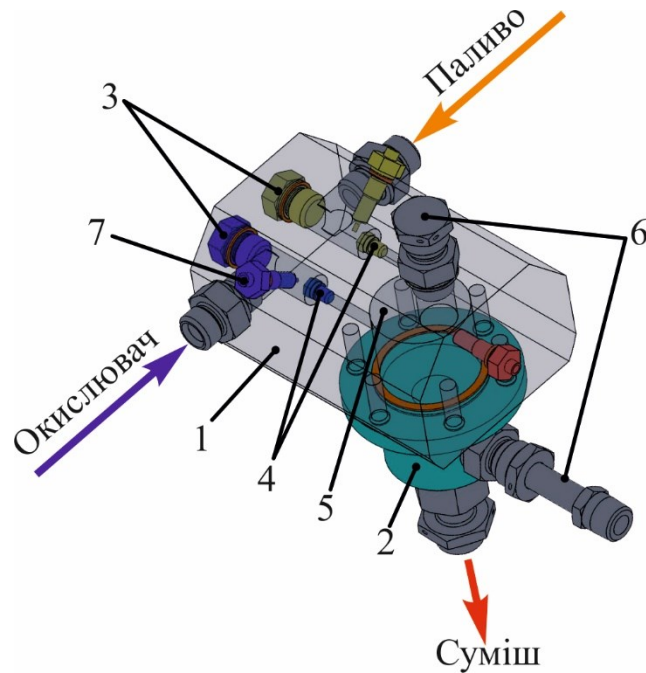


- 1, 11 – балони з газами; 2, 4, 12, 14 – редуктори; 3, 13 – вентилі;
 5, 15 – фільтри; 6, 10, 16, 20 – електромагнітні клапани;
 7, 17 – проміжні ємності; 8, 18 – датчики тиску;
 9, 19 датчики температури; 21 – критичні отвори в змішувачі

Рисунок 2.1 – Схема пристрою для приготування бінарних сумішей удосконаленим методом критичних отворів

Конструкція змішувача (модель наведено на рис. 2.2), складається з корпусу 1, кришки з вихідними отворами 2, технологічні корки 3. Змішувач розроблений з урахуванням реалізації концепції подачі компонентів газової суміші крізь спеціальні сопла 4 та подальшим змішуванням суміші за допомогою зустрічних потоків у камері 5. Використання сопел 4 з різними площинами перерізу критичних отворів для окиснювача й палива відповідно при надкритичному перетіканні з постійним тиском, забезпечує задане співвідношення компонентів газової суміші (стехіометричне). Корпус у змішувачі виготовлений із масиву металу з метою зменшення впливу навколишнього середовища на параметри перетікання газів.

У конструкції змішувача передбачено: при переході на інший склад паливної суміші заміна сопел через технологічні корки, для проведення додаткових досліджень встановлювати необхідні датчики вимірювання 7. Для запобігання можливого загоряння суміші при експлуатації в конструкції змішувача передбачені канали продувки (штуцери 6) камери 5 нейтральним газом.



- 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – технологічні корки; 4 – сопла;
5 – камера змішувача; 6 – штуцери; 7 – датчики

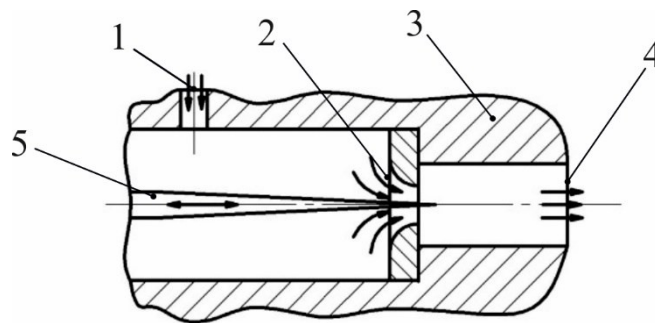
Рисунок 2.2 – Модель змішувача газів

При переході від одного газу до іншого або за необхідності зміни стехіометрії складу суміші використовують набір відкаліброваних сопел, що ускладнює достатньо оперативно переналагодити систему на необхідний технологічний процес.

Для достатньо оперативної зміни відсоткового складу суміші запропоновано використання сопла, яке регулюється [20]. Серед різноманітності створених і розроблених модифікацій сопел, що регулюються, можна відзначити основні елементи регулювання змінення геометрії

зовнішнього контура; центральне тіло геометрії, яке змінюється; центральне тіло, що переміщується [10, 42, 4].

Центральне тіло, яке переміщується, дозволяє визначати площу критичного перерізу за його положенням і є більш технологічним у виготовленні. Схема запропонованого рішення кільцевого сопла з конічним центральним тілом, що переміщується наведена на (рис. 2.3) [20]. В такому випадку замість корків 3 (рис. 2.2) встановлюються спеціальні високоточні регулювальні пристрої управління положенням центрального конічного тіла.



- 1 – подача газу; 2 – критичний отвір; 3 – корпус; 4 – вихід газу;
5 – конічне центральне тіло, що переміщується

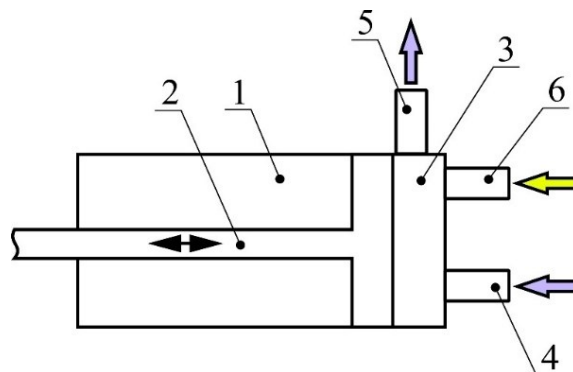
Рисунок 2.3 – Схема сопла з конічним центральним тілом, що переміщується

З метою зменшення відхилень співвідношення компонентів у газовій суміші пропонується новий метод приготування, вдосконалений на основі патенту № 112566 України МПК В01F 3/02, G06D 11/00 [52], в якому здійснюється попередня підготовка змішувальної камери її продувкою і подальшій подачі складових газів до відповідних заданому процентному складу парціальних тисків у змішувальну камеру. Продувка здійснюється M -кратною подачею до змішувальної камери газу відсотковий вміст якого найвищий у суміші під тиском P_{np} , після чого здійснюється скидання цього газу до атмосферного тиску $P_{атм}$. Кількість подач і скидань газу N визначається вміст зазначеного газу в складі суміші з потрібною точністю за тиску продування P_{np} . Після цього кожен із N газів подається послідовно до

змішувальної камери до досягнення парціальних тисків, що відповідають заданому відсотковому складу газової суміші.

Недоліком даного методу є неефективні втрати газу під час проведення попередньої підготовки змішувальної камери циклічним подаванням в камеру та скиданні в атмосферу газу, відсотковий вміст якого найвищий у суміші. При такому методі підготовки камери об'єм якої 10 л при чотирьох кратному продуванні відбувається втрата $\sim 2,67\%$, а при п'яти $\sim 3,33\%$ від початкового вмісту стандартного газового балона високого тиску ($V = 40$ л., $P = 150$ атм) [81].

Запропоновано [51] перед підготовкою змішувальної камери її об'єм зменшити до мінімально можливого, після завершення продувки камери її об'єм збільшити до максимального або заданого значення, що дозволить зменшити непродуктивні витрати газу при підготовці змішувальної камери.



1 – змушувальна камера; 2 – рухомий поршень; 3 – зменшений об'єм камери; 4, 6 – канали подачі компонентів; 5 – скидання в атмосферу

Рисунок 2.4 – Схема змінення об'єму змішувальної камери

Реалізація такого способу можлива наступним чином. перед підготовкою камери 1 (рис. 2.4) її об'єм 3 зменшити, наприклад, переміщаючи в камері 1 поршень 2. Зменшивши об'єм камери до мінімального значення 3, що може забезпечуватись технічними засобами регулювання, в камеру здійснюють N -кратну подачу компоненту суміші 4, що має максимальний

процентний вміст в суміші, до тиску продувки P_{np} з подальшим зниженням тиску газу до атмосферного $P_{атм}$ через канал продувки 5. При цьому кількість N подач і скидань цього газу визначають необхідною точністю вмісту даного компонента в газовій суміші при тиску продувки P_{np} . Після продувки камери її об'єм збільшують до заданого значення, що може забезпечуватись технічними засобами регулювання та подають у неї задані компоненти суміші 4, 6 визначеним чином, послідовно до парціальних тисків або одночасно, наприклад, через критичні отвори.

Зменшуючи об'єм камери перед її підготовкою, непродуктивні витрати газу знижуються пропорційно до зміненого об'єму. Наприклад, зменшуючи об'єм камери від 10 л до 0,1 л при 5-ти кратному продуванні призводить до зниження витрати початкового вмісту стандартного газового балона високого тиску ($V = 40$ л., $P = 150$ атм) від 3,33 % до 0,33 %. Отже, запропонований метод приготування газової суміші заданого складу дозволяє досягти зменшення непродуктивних витрат газів при попередній підготовці змішувальної камери (N кратною продувкою змішувальної камери).

Зважаючи на універсальність методу критичних отворів при переході на інші компоненти газової суміші пропонується так само, як при продувці змішувальної камери, зменшувати об'єм проміжної ємності перед продувкою для зменшення не технологічних витрат газів.

2.2 Аналітична модель сумішоутворення при застосуванні запропонованого методу

Задачі, пов'язані з розрахунками характеристик імпульсних аеродинамічних труб, детально досліджувалися в наукових працях. Особлива увага приділяється аналізу перетікання газу, і для цих завдань використовуються певні припущення та моделі [1]:

– квазістаціонарність перетікання, це означає, що параметри газу можуть змінюватися в часі, але вони вважаються однаковими по всьому об'єму кожної з ємностей;

- адіабатичність перетікання, тобто процес перетікання газу відбувається без теплових обмінів з оточуючим середовищем;
- застосування моделі досконалого газу.

Для визначення параметрів газів у проміжних ємностях використаємо перший закон термодинаміки:

$$dQ = dU + dL \quad (2.1)$$

Для ємності, яка має постійний об'єм $dL = 0$, а за адіабатичного витікання втрата тепла пов'язана лише з його виведенням разом з газом, який витікає:

$$dQ = -G i dt, \quad (2.2)$$

де G – масова витрата газу; i – ентальпія.

Проте, змінення внутрішньої енергії газу із застосуванням рівняння стану ідеального газу можна записати у вигляді:

$$dU = d(C_V m T) = C_V \frac{V}{R} \cdot dP = \frac{V}{k-1} \cdot dP \quad (2.3)$$

де V – об'єм посудини; k – показник адіабати відповідного компонента суміші газів.

З (2.1) і (2.3) витікає, що

$$dP = -((k-1)/V) \cdot G \cdot C_P \cdot T \cdot dt \quad (2.4)$$

Ураховуючи припущення та модель досконалого газу розглянемо процедуру для формування двокомпонентної суміші, співвідношення масових концентрацій компонентів якої дорівнює $\beta = c_1/c_2$.

Миттєве значення масової витрати при надкритичному перепаді тисків через критичний отвір встановлюється формулою [39]:

$$G = \frac{\mu F P}{\sqrt{RT}} \psi, \quad (2.5)$$

де $\psi = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$; F – площа перерізу критичного отвору; μ – коефіцієнт витрати; k – показник адіабати газу.

Поточні значення тиску і температури в ємності (2.5) визначаються як [39]:

$$P = P_0 (1 + Bt \cdot)^{\frac{-2k}{k-1}}, \quad (2.6)$$

$$T = T_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (2.7)$$

де $B = \frac{(k-1)F\sqrt{RT_0}}{2V}\psi$; P_0, T_0 – початкові тиск та температура у проміжній ємності; V – об'єм проміжної ємності; k – коефіцієнт адіабати газу, який перетікає через отвір з критичним перерізом.

Призначаючи значення площі критичного отвору, об'єму проміжної ємності та початкового тиску в ній для одного з компонентів (наприклад, F_2, V_2, P_{02}) та встановлюючи співвідношення площ критичних отворів встановимо виходячи з умов у початковий момент часу $G_1/G_2 = \beta$, $P_1 = P_2 = P_0, T_1 = T_2 = T_0$. Тоді з (2.5) отримаємо:

$$F_1 = \beta \cdot F_2 \frac{\mu_2 \sqrt{M_2} \psi_2}{\mu_1 \sqrt{M_1} \psi_1}, \quad (2.8)$$

де M_1, M_2 - молярні маси компонентів газової суміші.

Виходитимемо з того, щоб у ході витікання газів з ємностей забезпечити в них рівність температур. Підставляючи для обох компонентів вирази (2.6) і (2.8) у формулу (2.7) для температури в поточний момент отримаємо, що співвідношення $T_1 = T_2$ здійснюється тотожно при рівних початкових температур $T_{10} = T_{20} = T_0$ й об'ємів ємностей співвідношення яких задається виразом:

$$V_1 = \beta \cdot V_2 \frac{\mu_2 M_2 k_1 - 1}{\mu_1 M_1 k_2 - 1}. \quad (2.9)$$

Якщо суміш утворюють гази з рівними або близькими показниками адіабати (наприклад, $N_2+H_2, N_2+O_2, Ar+He$ и др.), при $P_{10} = P_{20} = P_0$ завдання площ критичних отворів виходячи з виразу (2.8), а обсягу проміжних ємностей

з виразу (5) забезпечує не тільки рівність поточних температур, а й практичну рівність поточних тисків. Виходячи з виразу (2.5), при цьому автоматично забезпечується і задане співвідношення масових витрат без застосування будь-яких регулювальних пристроїв.

У разі необхідності утворення суміші з газів з відмінними показниками адіабати (Cl_2+N_2 , CH_4+Ar , CH_4+N_2 та ін.), при виконанні умов (2.8) і (2.9) тиску в ємностях газів при закінченні будуть змінюватися по-різному. Однак якщо відмовитися від вимоги забезпечення сталості співвідношення миттєвих масових витрат компонентів, то у цьому випадку можна досягти точності забезпечення заданої масової концентрації газів у суміші за рахунок завдання початкових тисків у ємностях, виходячи з виразу:

$$\frac{\int_0^{\tau} G_1 dt}{\int_0^{\tau} G_2 dt} = \beta, \quad (2.10)$$

де τ - час наповнення камери сумішшю.

Для корекції початково тиску в ємності, яка дозволяє досить точно визначити співвідношення масових концентрацій компонентів [73], після підстановки в (2.10) виразів (2.5) – (2.8) отримуємо:

$$\frac{P_{01}}{P_{02}} = \frac{\int_0^{\tau} (1 + B_2 t)^{-\frac{k_2+1}{k_2-1}} dt}{\int_0^{\tau} (1 + B_1 t)^{-\frac{k_1+1}{k_1-1}} dt}. \quad (2.11)$$

При термоімпульсній обробці величина теплових потоків, що діють на деталі, що обробляються, визначається конвективним теплообміном [13]. Зважаючи на це для стабілізації теплових потоків під час виконання послідовних циклів оброблення ідентичних виробів необхідно забезпечити сталість коефіцієнта тепловіддачі, що залежить від густини суміші і початковий перепад температури між поверхнями деталей та продуктами горіння.

За першої умови, час наповнення робочої камери газовою сумішшю вираховується як час, за який маса одного з компонентів поданого в робочу камеру стане заданою. За прийнятих припущень, це призводить до наступної залежності:

$$m_2 = \int_0^{\tau} G_2 dt, \quad (2.12)$$

яка, після підстановки у ній виразів (2.6), (2.7) та інтегрування, дає визначення величини τ в (2.11) вираз:

$$\tau = \frac{1}{B_2} \left(\left(\frac{A_2}{A_2 - C_2} \right)^{\frac{k_2-1}{2}} - 1 \right), \quad (2.13)$$

де $A_2 = \mu_2 F_2 \psi_2 P_{02} (k_2 - 1)$ і $C_2 = 2m_2 B_2 \sqrt{R_2 T_0}$.

Для встановлення закону зміни тиску використовуватимемо рівність ентальпій струменів, які витікають з ємностей та струменів, які втікають у робочу камеру, що призводить до залежності зміни тиску в робочій камері від часу наповнення:

$$P_K = P_{01} \frac{V_1}{V_K - V_D} \left[1 - (1 + t \cdot B_1)^{\frac{-2k_1}{k_1-1}} \right] + \\ + P_{02} \frac{V_2}{V_K - V_D} \left[1 - (1 + t \cdot B_2)^{\frac{-2k_2}{k_2-1}} \right] + P_{K0}, \quad (2.14)$$

де V_D – сумарний об'єм деталей та пристосувань у камері; P_{K0} – початкове значення тиску в камері (зазвичай дорівнює атмосферному).

Для правильної роботи системи генерації суміші необхідне забезпечення надкритичного перепаду тиску між ємностями та камерою протягом усього часу наповнення, яке також залежить від показника адіабати газу:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &> P_K \cdot \left(\frac{2}{k_1 + 1} \right)^{-k_1/(k_1-1)} \\ P_2 &> P_K \cdot \left(\frac{2}{k_2 + 1} \right)^{-k_2/(k_2-1)} \end{aligned} \right\}. \quad (2.15)$$

Як указано в роботі [1], параметри паливної суміші в робочій камері не можуть визначатись в залежності від адіабатичного або політропічного процесів. Отже, для визначення температури в робочій камері застосуваємо рівняння стану досконалого газу:

$$T_K = \frac{P_K}{\rho_{\text{сум}} R_{\text{сум}}}, \quad (2.16)$$

де $\rho_{\text{сум}}$, $R_{\text{сум}}$ – щільність і постійна газова суміші, що визначаються за поточною масовою концентрацією компонентів виразами:

$$1/\rho_{\text{сум}} = c_1/\rho_1 + c_2/\rho_2, \quad (2.17)$$

$$R_{\text{сум}} = c_1 R_1 + c_2 R_2. \quad (2.18)$$

Коефіцієнти витрати критичних отворів, що входять у вирази (2.6), (2.8) і (2.13), є відношенням реальної масової витрати через критичний отвір до його досконалого значення і враховують стиснення струменя при закінченні і втрати на опір тертя. Для заданої конфігурації отворів з критичним перерізом їх можливо визначити опираючись на відомі методи, які використовують аналітичні рішення одновимірних моделей перебігу газу [11], або чисельно при моделюванні у CFD пакетах.

Розглянемо можливості використання запропонованої методики для забезпечення точного дозування компонентів стехіометричної паливної суміші CH_4O_2 ($\beta = 4$). Як вихідні дані для розрахунків прийняті такі значення:

– для CH_4 : $R = 518,37$ Дж/(кг·К), $M = 16,04 \times 10^{-3}$ кг/Моль, $\rho = 0,7168$ кг/м³, $k = 1,32$;

– для O_2 : $R = 259,8$ Дж/(кг·К), $M = 32,0 \times 10^{-3}$ кг/Моль, $\rho = 1,47$ кг/м³, $k = 1,4$.

Прийняті значення об'єму робочої камери термоімпульсного устаткування становлять 15×10^{-3} м³, робочий тиск суміші 1,0 МПа за температури 293 К. Початковими значеннями тиску та температури в проміжній ємності метану з об'ємом 10×10^{-3} м³ становлять 3,5 МПа за температурці 293 К, а отвір з критичним перерізом обрано з діаметром 1 мм.

Розраховані за формулами (2.8) та (2.9) значення діаметра отвору з критичним перерізом та об'єму проміжної ємності для кисню округлено з урахуванням можливостей виготовлення та склали 1,66 мм, $25,062 \times 10^{-3} \text{ м}^3$. Наступні розрахунки проведено для округлених значень.

З урахуванням вказаних значень параметрів час наповнення робочої камери термоімпульсного устаткування до заданого рівня тиску склав 7,62 с. Початковий тиск у проміжній ємності для кисню, порахований за залежністю (11), склав 3,446 МПа. На рис. 2.5 наведено графіки зміни тиску в проміжних ємностях метану та кисню за часом наповнення камери. Різниця температур у проміжних ємностях протягом заповнення не перевищує 0,002 К.

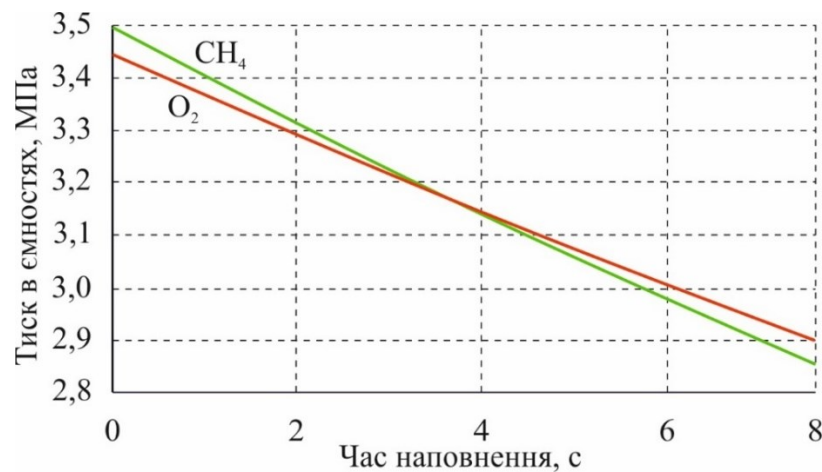


Рисунок 2.5 – Значення тиску в проміжних ємностях за часом наповнення робочої камери

На рис. 2.6 наведено графік залежності тиску в робочій камері часу наповнення сумішшю, отриманий з використанням виразу (2.14). На момент закінчення наповнення перепад тиску між ємністю кисню та камерою $P/P_K = 2,163$ (при значенні критичного перепаду тисків 1,893), а ємністю метану та камерою $P/P_K = 2,13$ (при значенні критичного перепаду тисків 1,844). Отже, умови (2.15) виконуються.

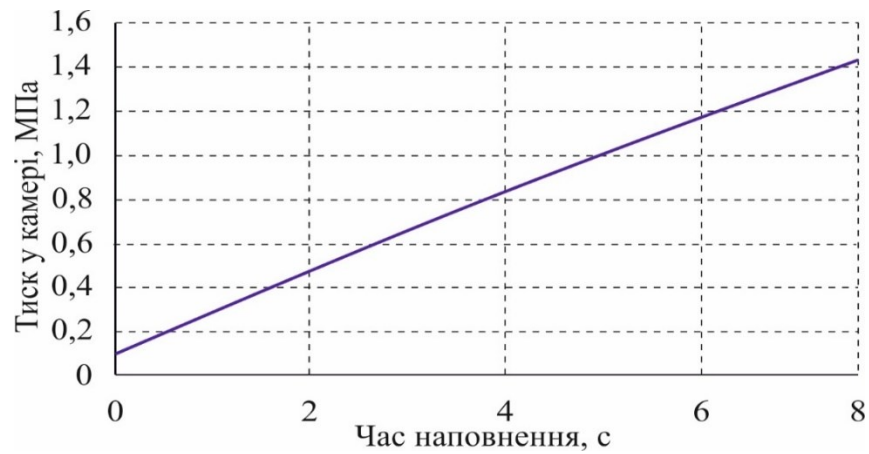


Рисунок 2.6 – Тиск в робочій камері за часом наповнення

На рис. 2.7 наведено графіки зміни миттєвого співвідношення масової витрати компонентів паливної суміші $\beta^* = G_{O_2} / G_{CH_4}$ за часом заповнення камери. На цьому ж рисунку показано значення заданого співвідношення масових концентрацій ($\beta = 4$ для стехіометричної суміші) та отриманої після закінчення наповнення величини даного співвідношення $\beta_{сер}$. В результаті теоретична похибка забезпечення співвідношення масових концентрацій компонентів паливної суміші склала менше 0,01 %.

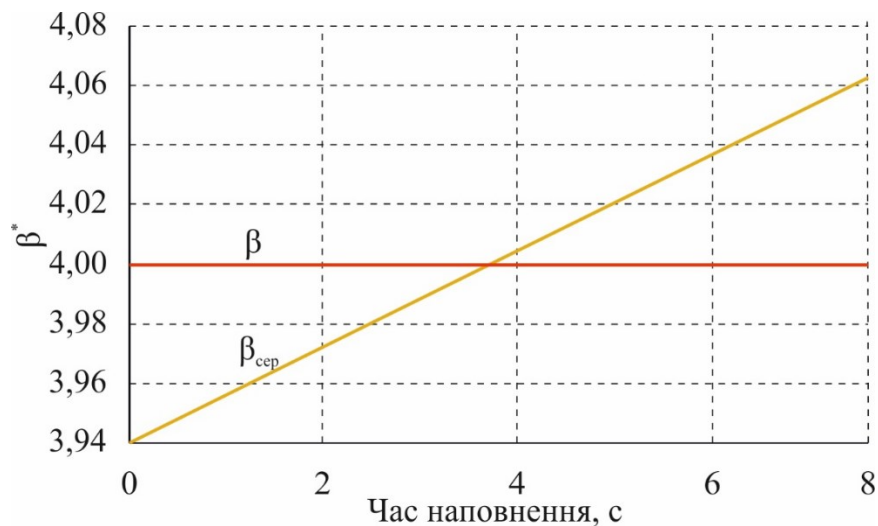


Рисунок 2.7 – Співвідношення масової витрати компонентів суміші за часом наповнення робочої камери

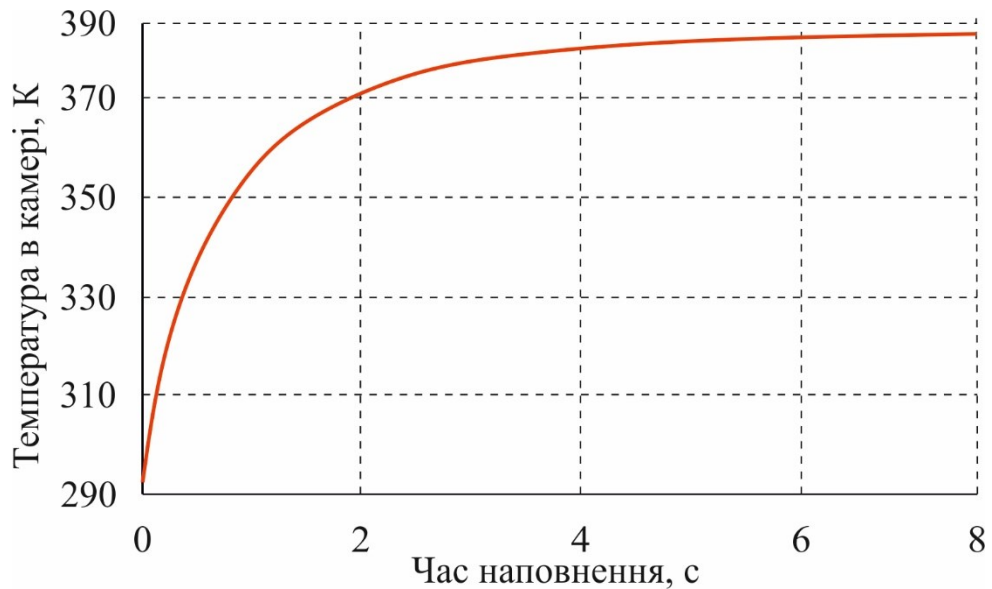


Рисунок 2.8 – Температура у робочій камері за часом наповнення

На рис. 2.8 наведено графік зміни температури паливної суміші в камері часу наповнення. За рахунок стиснення суміші кінцева температура перевищує початкову більш ніж на 80° .

Таким чином, вибір параметрів системи генерації суміші за залежностями (2.5) – (2.18) дозволяє забезпечити необхідну для прецизійного термоімпульсного оброблення точність дозування компонентів з використанням запропонованої модифікації методу критичних отворів.

2.3 Розробка числової моделі удосконаленого генератора газових сумішей

Використання математичного моделювання при вивченні перетікання газів і сумішеутворення та визначенні режимів наповнення, які забезпечують заданий рівень якості газової (паливної) суміші передбачає використання сучасних CAD/CAE систем, які використовують для інженерного аналізу метод кінцевих елементів. Нині існуючі CAE системи можна розділити на три категорії [2]:

- системи повнофункціонального інженерного аналізу з потужними засобами та великими за обсягом бібліотеками елементів для сіток методу

кінцевих елементів та моделей різних фізичних процесів. Найбільшого поширення серед них набули ANSYS, NASTRAN та ABACUS;

– системи інженерного аналізу, вбудовані в системи автоматизованого проектування, наприклад Catia CAEE ітегрований до CATIA, Unigraphics NX CAE ітегрований до Unigraphics NX, Pro/MECHANICA ітегрований до Pro/ENGINEER;

– системи інженерного аналізу середнього рівня – як з інтерфейсом, що вбудовується в CAD-системи (COSMOS/Motion, COSMOS/FloWorks, COSMOS/Works, для SolidWorks), так і ті які зчитують геометрію з CAD-систем (Procision, visualNastran).

Системи повного функціонального аналізу мають найширші функціональні можливості. Для них характерна наявність вбудованих засобів моделювання геометрії та можливості її імпорту з найбільш поширених CAD систем. Однак, як правило, у них відсутній асоціативний зв'язок із CAD-системою. Це призводить до того, що при внесенні змін до геометрії для проведення аналізу потрібно заново імпортувати геометрію та задати всі дані для розрахунку. Винятком є система ANSYS, в останніх версіях якої підтримується асоціативний зв'язок з багатьма CAD-системами та промислові стандарти геометричних даних ACIS, Parasolid, IGES та ін.

Це набуває особливого значення під час вирішення завдань методом чисельного експерименту. За двосторонньої асоціативності можливий варіант завдання сценаріїв розрахунку з різними початковими параметрами. Наприклад, для завдання дослідження сумішоутворення при наповненні камер термоімпульсних машин можливі варіації витрати і способу подачі компонентів паливної суміші, завдання різних значень CAD-параметрів (діаметр впускного каналу, місце розташування та орієнтація оброблюваної деталі в камері або будь-який інший параметричний розмір геометричної моделі) із знаходженням режимів наповнення, що забезпечують необхідну якість паливної суміші.

Перевагою також є сертифікація програмних продуктів ANSYS за низкою міжнародних стандартів: ISO-9000, ISO-9001 та ISO 9000-3; The TickIT initiative; British standard BS 5750; NAFEMS QA certification; Lloyd's Register's software certification; ASME NQA-1; стандарти Американської атомної промисловості-10CFR50 Appendix B; The ANS/IEEE series of QA and Software Standards; The ANSI N45.2 series; NUREG/CR-4640 - Hardbook of Software Quality Assurance; Techniques Applicable to the nuclear Industry; ASME NQA-2, Part 2.7, що є додатковим підтвердженням достовірності отриманих результатів при використанні зазначеного продукту [2].

Для проектувальних розрахунків режимів подачі компонент паливної суміші особливе значення набуває наявність вбудованих модулів проведення чисельного експерименту з можливим визначенням оптимальних параметрів проектування за заданою цільовою функцією. Таким елементом у системі Workbench Ansys є модуль DesignXplorer.

Що стосується проектування процесу сумішоутворення послідовність розв'язання задачі пошуку параметрів моделі може бути описана наступним чином: отримання 3-D моделі із CAD системи, створення математичної моделі в препроцесорі модю CAE, генерація сітки, аналіз результатів у постпроцесорі. Для формулювання завдання проектування має бути сформована геометрична та фізична моделі.

Інформація про об'єкт у вигляді 3D геометрії імпортується з будь-якої існуючої CAD-системи. Як правило, вона має бути доопрацьована засобами вбудованих модулів для забезпечення можливості побудови якісної розрахункової сітки кінцевих елементів. За отриманими даними будується геометрія розрахункової області (наприклад: порожнина ємності та газових трактів).

У спеціалізованому CFD пакеті формується математична модель завдання (наприклад наповнення проміжної ємності): граничні та початкові умови, характеристики компоненту паливної суміші і т.п. Ряд елементів

моделі можуть бути задані як параметри. Наприклад, величина перепаду між мережевим тиском і тиском в ємності та ін.

Важливе значення для отримання розв'язання задачі є побудова якісної сітки. Специфіка розв'язуваної задачі вимагає додаткового розбиття розрахункової області на тривимірні обсяги, зайняті різними середовищами (газ, тверде тіло, окремі досліджувані області), так званих доменів. Наприклад розрахункову область при натіканні до ємності можна розділити на такі частини: внутрішній об'єм досліджуваної ємності, внутрішній об'єм газового тракту, а от при дослідженні перетікання через критичний отвір важливо враховувати теплообмін із металевою частиною, тому є необхідність створення домену твердого тіла. Для кожного з отриманих доменів необхідно задавати початкові та граничні умови.

Для дослідження процесів сумішоутворення найкращі результати зі збіжності та швидкості отримання рішення дає використання гексагональних сіток. Однак їх побудова при використанні спеціалізованих сіточних генераторів типу ICEM CFD пов'язано з великими часовими витратами. Тому використання таких сіток може бути виправдане за необхідності проведення об'ємних чисельних експериментів для особливо складних завдань або окремих областей які найбільше впливають на результат [2].

Попри те, що нестационарні рівняння Нав'є–Стокса уможливають опис реальних турбулентних течій, практичне дослідження турбулентності за допомогою методів прямого числового моделювання завдяки системі рівнянь Нав'є–Стокса нині ускладнюється через великі обчислювальні витрати. Зазначене пояснюється тим, що методам прямого числового моделювання необхідне виконання нестационарного тривимірного розрахунку, а для його проведення потрібна обчислювальна потужність, яка пропорційна до загальної кількості вузлів сітки та часових кроків, а також за збільшення числа Рейнольдса удвічі витрати на обчислення збільшаться на порядок. Саме тому застосування означених методів у розрахунках течій складної геометрії є неоптимальним, на практиці методи прямого числового моделювання

застосовуються тільки для розраховування простих турбулентних течій за низьких чисел Рейнольдса. Альтернативним підходом, що набув найбільшого поширення нині, є метод вирішення рівнянь Нав'є–Стокса, які усереднені за Рейнольдсом, що відображається заміною випадково змінюваних характеристик течії (тиск, густина, швидкість) сумами пульсаційних та осереднених складових.

Для проведення практичних розрахунків у цій роботі використовуватимуться тетраедричні сітки. Розрахункова сітка автоматично генерується засобами модуля ANSYS CFX-Mesh. Це спеціалізований модуль, призначений для дискретизації розрахункових областей і створення сітки кінцевих елементів високої якості для завдань гідро-газодинаміки. Для більш точного моделювання течій в прикордонному шарі поблизу стінок необхідно будувати шари з призматичних елементів. Також відомо, що для забезпечення стійкості рішення під час побудови розрахункової сітки необхідно забезпечити дотримання низки критеріїв якості стосовно: відношення радіусу описаної сфери до радіуса вписаної, відношення довжини найбільшого ребра до радіуса вписаного кола, відношення радіуса описаного кола до довжини найбільшого ребра, відношення довжин найбільшого та найменшого ребер, відношення 4-го ступеня об'єму тетраедра до куба суми квадратів площ граней, відношення куба середнього арифметичного довжин ребер до об'єму тетраедра, відношення куба середнього геометричного довжин ребер до об'єму тетраедра, найбільший двогранний кут, мінімальний тілесний кут [82].

На практиці для отримання якісного рішення зазвичай контролюють два параметри з наведених у таблиці: мінімальний тілесний кут (для сітки 53° при допустимому 20°) і співвідношення між радіусом вписаної і описаної навколо елемента сфери (0,3 при допустимому не менше 0,2) [2].

У постпроцесорі ANSYS CFX містяться потужні засоби аналізу якісних та кількісних результатів. Засоби відображення графічної інформації дають можливість проаналізувати структуру потоку за допомогою ізоповерхонь, перерізів, векторів, траєкторій та інших методів. Аналіз кількісних результатів

можливий завдяки вбудованих функцій, що дозволяє досліджувати відповідність параметрів за введеними кількісними критеріями оцінки її якості. У постпроцесорі існує можливість генерації звітів з описом вихідних даних і необхідних результатів моделювання.

Перевагою інтегрованої CAD/CAE-системи є можливість асоціативного зв'язку з блоками геометрії і препроцесора, що дозволяє змінювати параметри геометричної та математичної моделі з автоматичною перебудовою розрахункових сіток. Це дозволяє будувати ефективні методи проектування системи сумішеутворення на основі запропонованих у цій роботі рішень.

2.3.1 Моделювання наповнення резервуару компонента

Використовуючи метод скінчених елементів, було проведене числове моделювання процесу наповнення резервуару газовою сумішшю. Головна мета полягала в розрахунку параметрів тиску, температури та маси газового компоненту.

З метою ефективного зменшення обсягу обчислювальних ресурсів було вирішено спростити реальну геометричну модель. Це було досягнуто заміною трубопровідної магістралі на ємності, при цьому забезпечуючи збереження їхніх об'ємів. Отже, розрахункова модель представляє собою внутрішню порожнину області генерації газової суміші (рис. 2.9). Ця область складається з двох газових доменів із спільним інтерфейсом, що відображає границю між областями високого та низького тиску відповідно реальній схемі встановлення електромагнітного клапана. Геометрія внутрішньої порожнини ємності ідентична реальній (домен 2). У місцях розташування сенсорів тиску та температури знаходяться відповідні точки моніторингу.

Моделювання процесу наповнення резервуару чистим азотом було виконане за допомогою моделі ідеального газу. Розрахункова модель розділена на 1671 тис. скінчених елементів з максимальним лінійним розміром 3 мм (рис. 2.10), що забезпечило значення числа Куранта $C < 5$.

Для розв'язання ключових рівнянь моделі було використано метод скінчених об'ємів [64]. За цим підходом значення фізичних змінних обчислювалися (і зберігалися) тільки в центрах скінчених елементів, а на гранях цих елементів проводилися розрахунки потоків маси, імпульсу, енергії. Одночасно просторові похідні апроксимувалися за допомогою неявних різницевих операторів другого порядку точності. Для коректного відображення турбулентного спектру в пристінковій області було створено п'ять шарів скінчених елементів.

У розрахунковій моделі на вході були задані умови постійної витрати за часом наповнення, теплообмін – статична температура, напрямок потоку – вздовж нормалі до входу, режим потоку – дозвуковий, (рис. 2.9). Ці початкові умови є найбільш сталі для розв'язку рівнянь нестационарної течії. Тим не менше, усвідомлюючи відхилення від реальних параметрів роботи редуктора, постійність витрати є припущенням, яке буде враховано при порівнянні з натурним експериментом. Прийняті початкові умови експериментів [57, 58] подано в табл. 2.1.

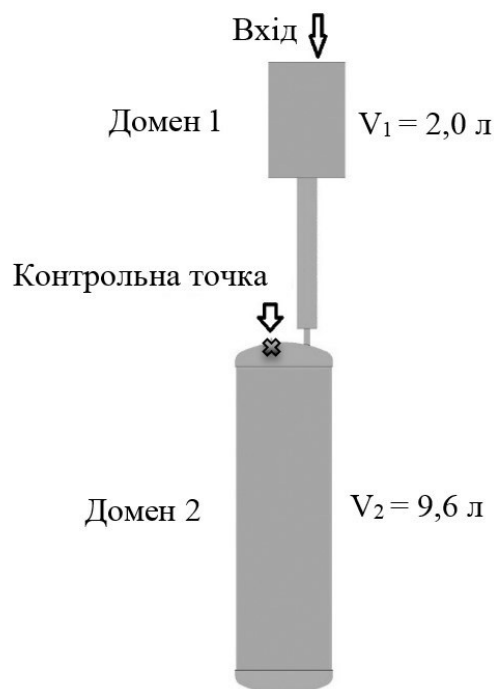


Рисунок 2.9 – Еквівалентна геометрична модель реального експериментального стенду [58]

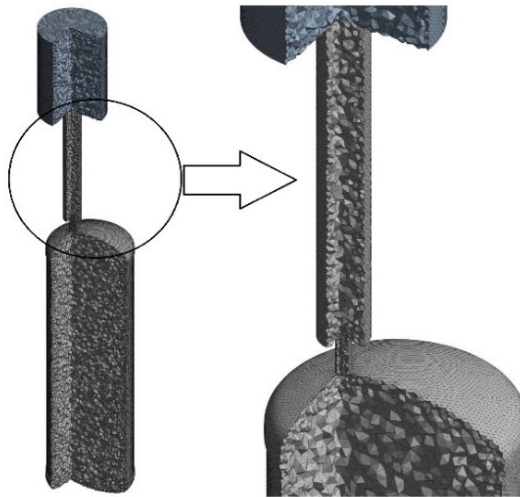


Рисунок 2.10 – Скінчено-елементна розрахункова модель експериментального стенду [58]

Таблиця 2.1 – Початкові умови експериментів [58]

Параметр	№ експерименту	
	1	2
Початковий тиск у ємності, Па	476569,32	455444,58
Тиск через редуктор, атм	11	11
Середня витрата редуктора, г/с	15,6	12,4
Температура в резервуарі, К	289,21	288,78
Об'єм ємності, м ³	0,009605	0,009605
Проміжний об'єм, м ³	0,002	0,002
Початкова маса компоненту (азот) у	53,333	51,045
Час наповнення, с	2	2,8
Молярна маса азоту, г/моль	28	
Газова постійна азоту, Дж/(моль×К)	8,314	
Число Прандтля для $T_0=290$ К	0,716	

Теплообмін між газом і стінкою є дуже важливим параметром для моделі наповнення, але процес розрахунку його критично збільшує вимоги до потужності вирішувача, тому його не взято для цього дослідження. Замість

цього, були створені розрахункові моделі для 2-х типів граничних умов теплообміну:

- відсутній теплообмін – адіабатична стінка;
- стінка ємності має постійну температуру.

Це дозволило визначити вплив цих умов у кількісному вираженні похибки розрахунку маси складової в резервуарі.

Постановка задачі наповнення резервуару описується системою рівнянь, яка враховує закони збереження маси (рівняння нерозривності), імпульсу (рівняння Нав'є-Стокса), енергії нестационарної просторової течії застосовуючи підхід Ейлера в декартовій системі координат ($x_i, i = 1, 2, 3$) [88]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R), \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial P}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon, \quad (2.21)$$

де u_i – складові вектора швидкості, м/с;

$\rho = \frac{P}{RT}$ – густина газу (за ідеального газу), кг/м³;

$H = h + \frac{\rho u^2}{2}$ – ентальпія, Дж;

τ_{ik} – тензор в'язких зсувних напружень, Па;

q_i – питомий тепловий потік, Вт/м².

Тензор в'язких зсувних напружень розраховується таким рівнянням:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right), \quad (2.22)$$

де $\mu = \mu_l + \mu_t$ – коефіцієнт в'язкості;

μ_l – коефіцієнт молекулярної в'язкості;

μ_t – коефіцієнт турбулентної в'язкості;

δ_{ij} – дельта-функція Кронекера (якщо $i = j$, тоді $\delta_{ij} = 1$; якщо $i \neq j$, тоді $\delta_{ij} = 0$);

k – кінетична енергія турбулентності, Дж.

Тензор напружень Рейнольдса в наближенні Буссінеска:

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.23)$$

Для визначення коефіцієнта турбулентної в'язкості μ_t використано рівняння SAS SST-моделі турбулентності, що показує високу точність при моделюванні пристінкових течій [63]:

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)}, \quad (2.24)$$

де $F_2 = \tanh(\arg_2^2)$;

$\arg_2 = \max\left(2 \frac{\sqrt{k}}{0,09 \omega y}; \frac{500 \nu}{y^2 \omega}\right)$ – функція, яка дорівнює одиниці для

пристінкового шару та нулю для вільних шарів;

$\Omega = (\partial u / \partial n)$ – похідна швидкості течії в напрямі нормалі до стінки.

Щоб визначити кінетичну енергію та її дисипацію використано рівняння:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu_t + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \omega) &= \frac{\gamma \rho}{\mu_m} \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu_t + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + 2 \rho (1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{aligned} \quad (2.26)$$

де β , β^* , σ_k , σ_ω – емпіричні константи;

F_1 – функція, як перемикач між моделями, таким чином, щоб поблизу стінки вона дорівнювала одиниці, а у віддаленні від стінки – нулю.

За залежністю (2.27) визначається питомий тепловий потік:

$$q_k = - \left(\frac{\mu_l}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) c_p \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad (2.27)$$

де Pr – число Прандтля;

$\sigma_c = 0.9$ – емпірична константа;

c_p – питома теплоємність за постійного тиску, Дж/(Кг×К).

При налаштуванні вирішувача крок розв’язання рівнянь за часом встановлено адаптивний за числом Куранта $C < 5$. Схема за часом – Second Order Backward Euler. Інші – High Resolution.

Визначення залежностей параметрів процесу розрахунків за часом використана мова CEL. Таким чином, маса компоненту газу в розрахунковий момент часу в об’ємі ємності розраховувалась інтегруючи значення густини газу:

$$m(t) = \text{volumeInt}(\rho(t)) @ \text{Volume} \quad (2.28)$$

Відповідно до визначених вище завдань дослідження проведено серію числових експериментів й отримані залежності за часом наповнення температури в контрольній точці, середньої температури в резервуарі, тиску й маси газу.

На рис. 2.11 показані вектори швидкості та поля температур в проміжній стадії наповнення. На рис. 2.12 й рис. 2.13 показані графіки розрахунків за моделями із двома типами граничних умов (стінка з постійною температурою (ПТС) і адіабатична стінка (АС)) змінення температури в ємності за даними експериментів № 1 і № 2 (табл. 2.1) відповідно [57]. При аналізі результатів виявилось що, значення осередненої за об’ємом температури дуже відрізняється від температури в контрольній точці.

Відхилення значень розрахунків для моделей з різними граничними умовами становлять для температур у контрольній точці – 9 %, для осередненої температури – 6 %.

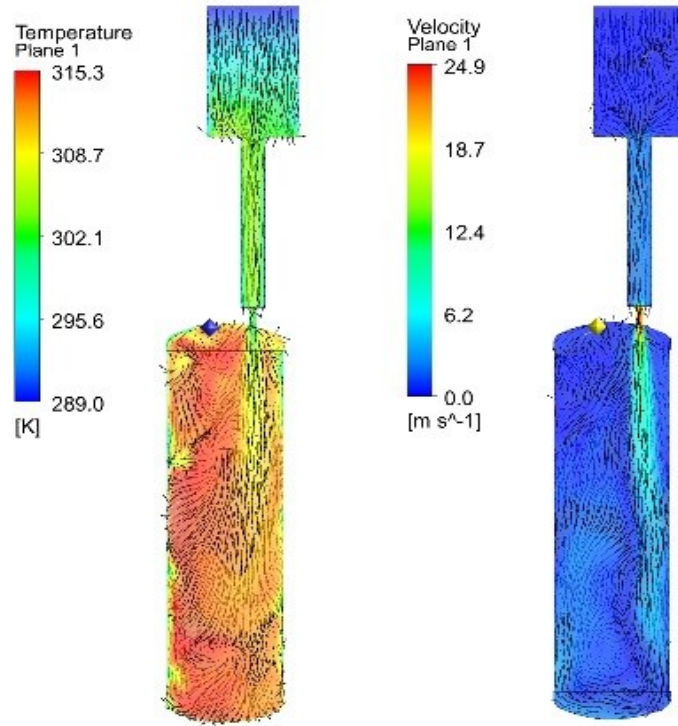


Рисунок 2.11 – Поля температури і швидкості на проміжних стадіях наповнення [58]

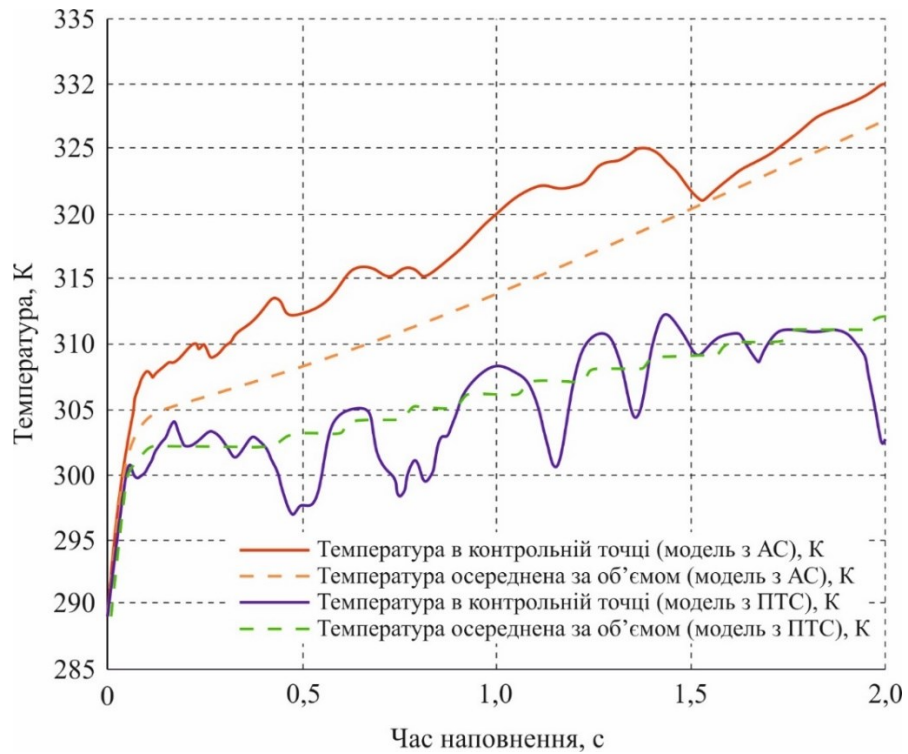


Рисунок 2.12 – Температури газу в резервуарі за часом наповнення з витратою $G=15,6$ г/с

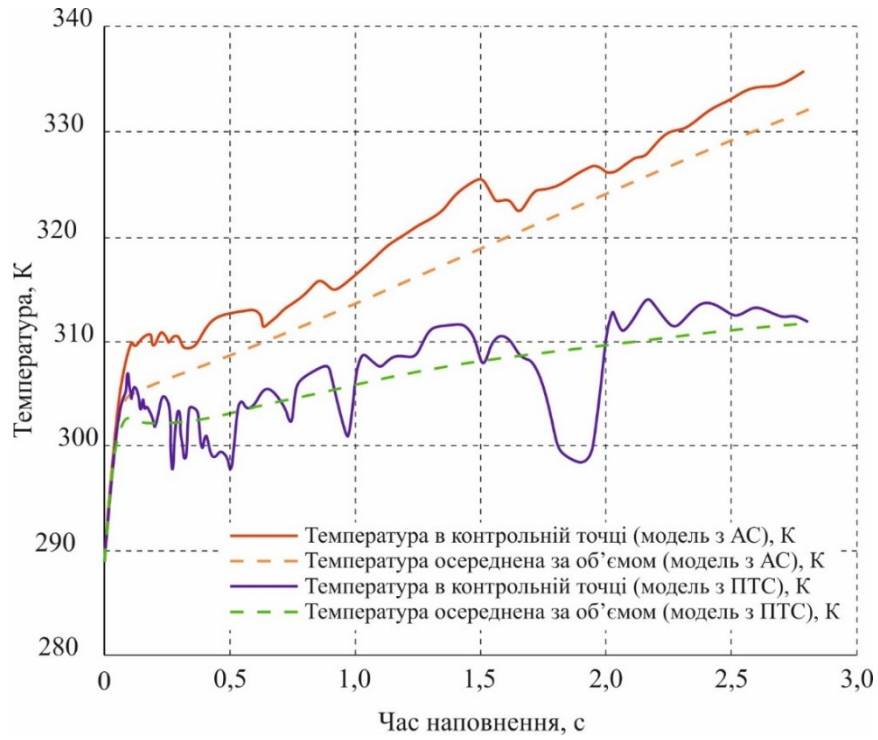


Рисунок 2.13 – Температури газу в резервуарі за часом наповнення з витратою $G=12,4$ г/с

На рис. 2.14 й рис. 2.15 наведено графіки розрахунків моделей змінення тиску із двома типами граничних умов в резервуарі за даними 2.1 № 1 і № 2 відповідно.

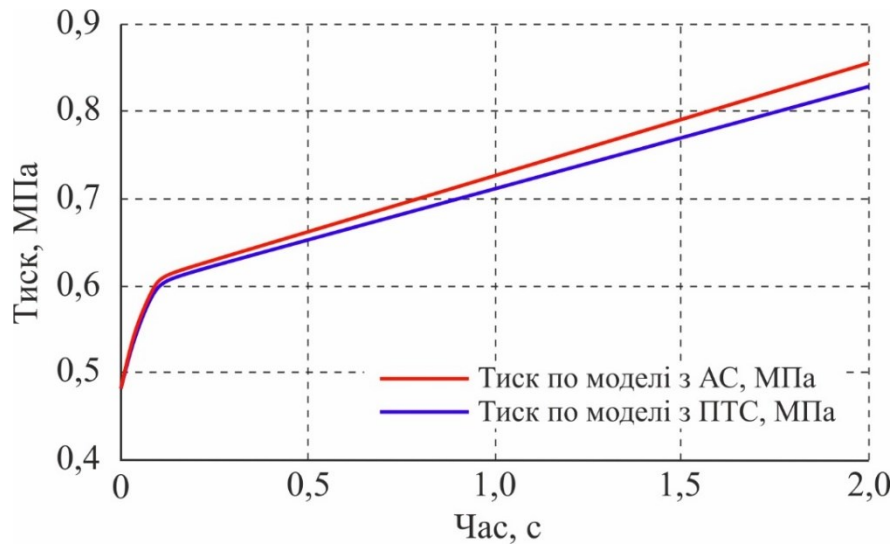


Рисунок 2.14 – Тиск в резервуарі за часом наповнення з витратою $G=15,6$ г/с

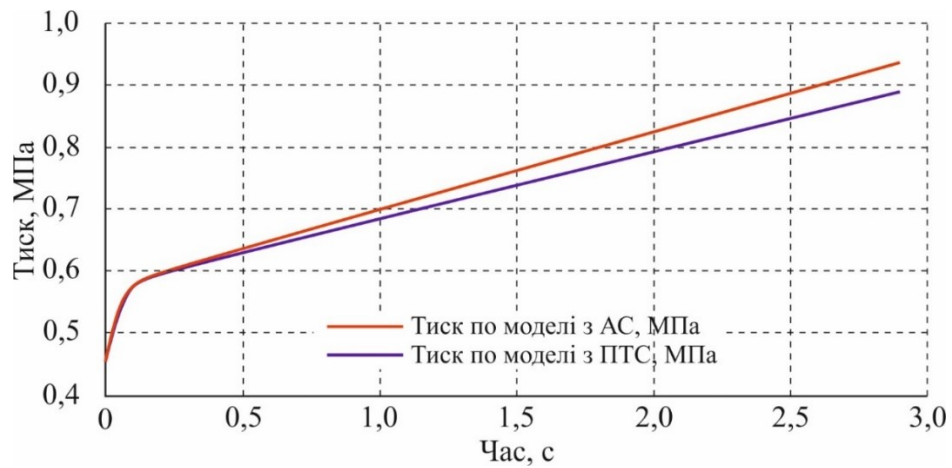


Рисунок 2.15 – Тиск в резервуарі за часом наповнення з витратою $G=12,4$ г/с

При порівнянні графіків зміни тиску за часом наповнення для моделей з різними параметрами теплообміну на стінці встановлена різниця між значеннями склала 4 % для витрати 15,6 г/с й 5 % для витрати 12,4 г/с. При цьому, значення тиску з адіабатичною стінкою вище ніж зі стінкою з постійною температурою, що спричинено відсутністю теплообміну і, внаслідок чого, додатковим підвищенням тиску спричинений нагріванням газу в резервуарі. Аналогічно отримані графіки змінення маси газу за часом наповнення резервуару з витратою 15,6 г/с (рис. 2.16) й 12,4 г/с (рис. 2.17).

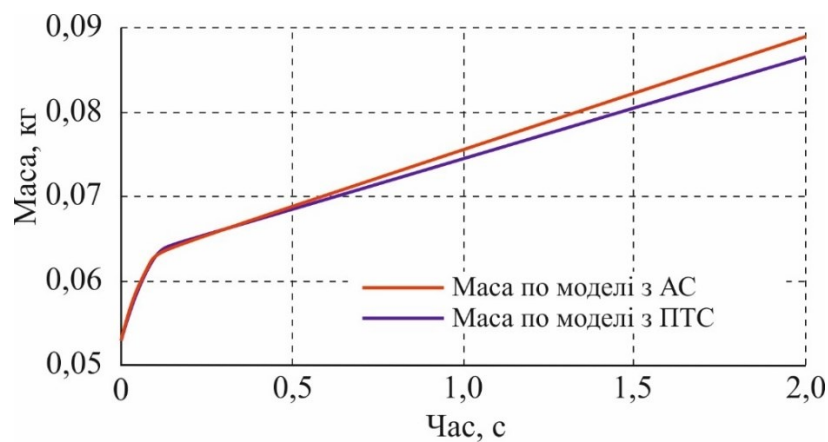


Рисунок 2.16 – Маса газу в резервуарі за часом наповнення з витратою $G=15,6$ г/с

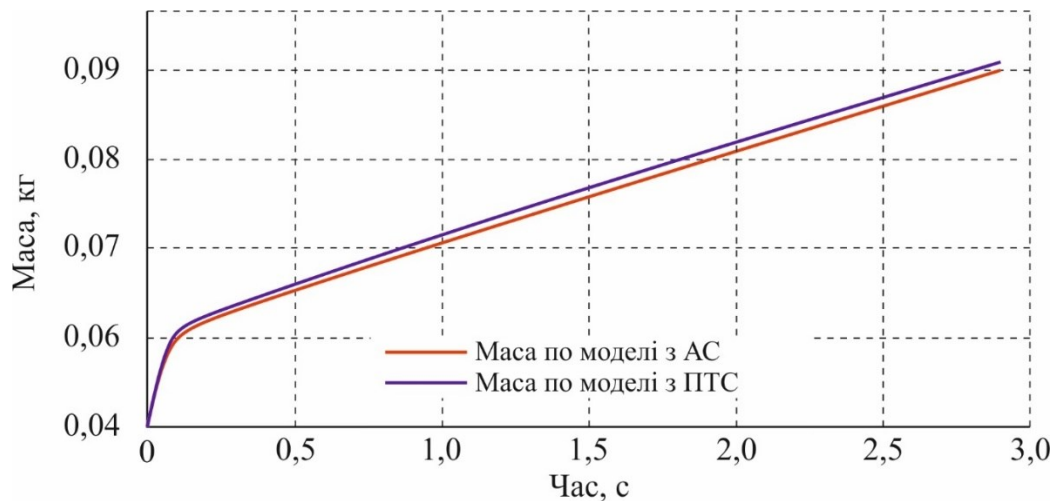


Рисунок 2.17 – Маса газу в резервуарі за часом наповнення з витратою
 $G=12,4$ г/с

2.3.2 Моделювання змішувача (забезпечення гомогенності суміші)

У роботі [90] детально розглянуто вплив гомогенності газової суміші на енергетичну ефективність термоімпульсного оброблення. Тому очевидно, що для аналізу ефективності генератора паливної суміші, необхідно дослідити процес перемішування компонентів газової суміші при перетіканні через розроблений змішувач. Мета цього дослідження полягає у науково-експериментальній оцінці конструктивних рішень змішувача у забезпеченні гомогенності газової суміші та відхилення концентрації компоненту. Завдання включає проведення числових експериментів для вивчення процесу перетікання потоку газових компонентів крізь сопла змішувача в системі генерації суміші, який забезпечує її стехіометричний склад і гомогенність.

При постійному співвідношенні тиску необхідному для забезпечення надкритичного режиму течії на вході до камери змішувача використані сопла 4 для палива та окислювача (рис. 2.2) з відомими поперечними перерізами отворів $0,912016$ мм² та $2,400474$ мм² відповідно.

Використовуючи метод скінчених елементів та програму Ansys-CFX [64], було проведено числове моделювання газодинамічного процесу утворення суміші із визначеним компонентним складом під час перетікання

через змішувач у системі генерації суміші для отримання параметрів масової витрати компонентів газової суміші, швидкостей газового потоку, полів температури та тиску.

Для проведення розрахунків було створено модель, що включає в себе внутрішню порожнину області змішувача генератора газової суміші та фрагмент металевого корпусу змішувача (рис. 2.18), що необхідно для урахування теплообміну піл час критичного перепаду тиску в соплах. Саме в критичних отворах сопел газу перетікають з місцевою швидкістю звука. У вказаних фрагментах розрахункова модель виконана зі спільним інтерфейсом з двох доменів. Внутрішня порожнина змішувача, що досліджується ідентична геометрії виготовленого. Моніторинг проведено з урахуванням середньої молярної концентрації метану та кисню на виході зі змішувача.

У моделюванні наповнення метаном та киснем використані моделі ідеального газу. Розрахункова модель поділена на 703 тисячі скінчених елементів (рис. 2.19), число Куранта обрано $C < 5$.

Для рішення визначальних рівнянь розрахункової моделі застосовано метод скінчених об'ємів [64], в якому значення фізичних змінних обчислювалися та зберігалися тільки у центрах скінчених елементів, на гранях елементів обчислювалися потоки маси, енергії та імпульсу. А просторові похідні апроксимовані з неявними різницевиими операторами з точністю другого порядку. З метою коректного відтворення пристінкової течії у межовому шарі було впроваджено п'ять шарів скінчених елементів.

У розрахунковій моделі на визначених входах задано умови з постійними тисками палива та окислювача, що забезпечують подачу компонентів газової суміші з стехіометричним співвідношенням, водночас відхилення молярної концентрації визначено не вище 1 %. Зокрема, було проведено дослідження метано-кисневої суміші співвідношенням компонентів 1:2 ($\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$). Напрямок потоку орієнтований вздовж нормалі до входу, а його режим – надзвуковим. Теплообмін компонентів

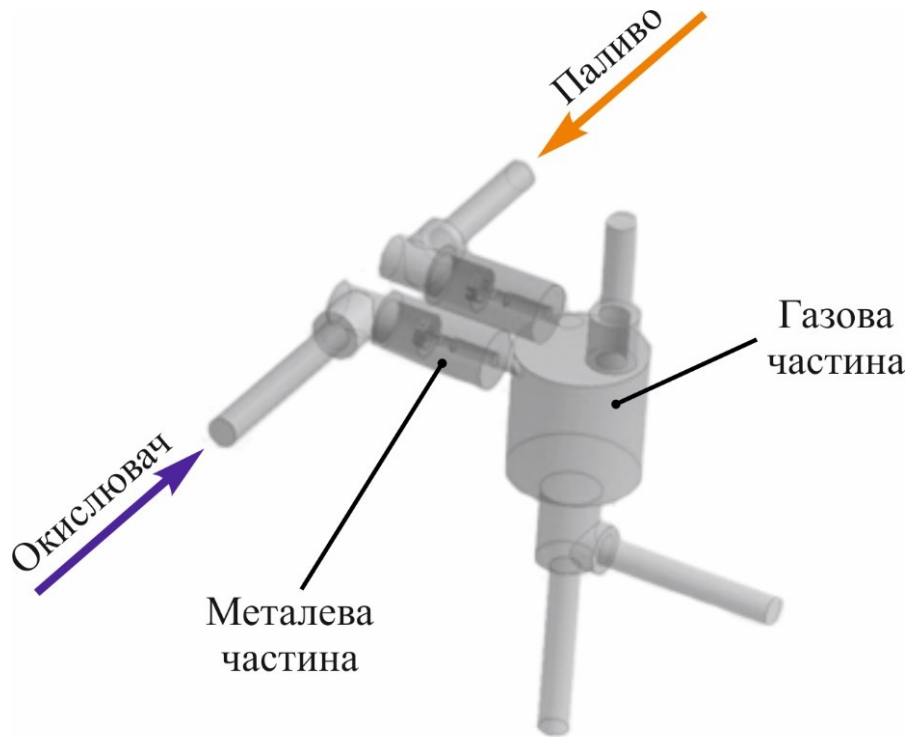


Рисунок 2.18 – Геометрична модель, що еквівалентна порожнинам реального змішувача генератора газової суміші

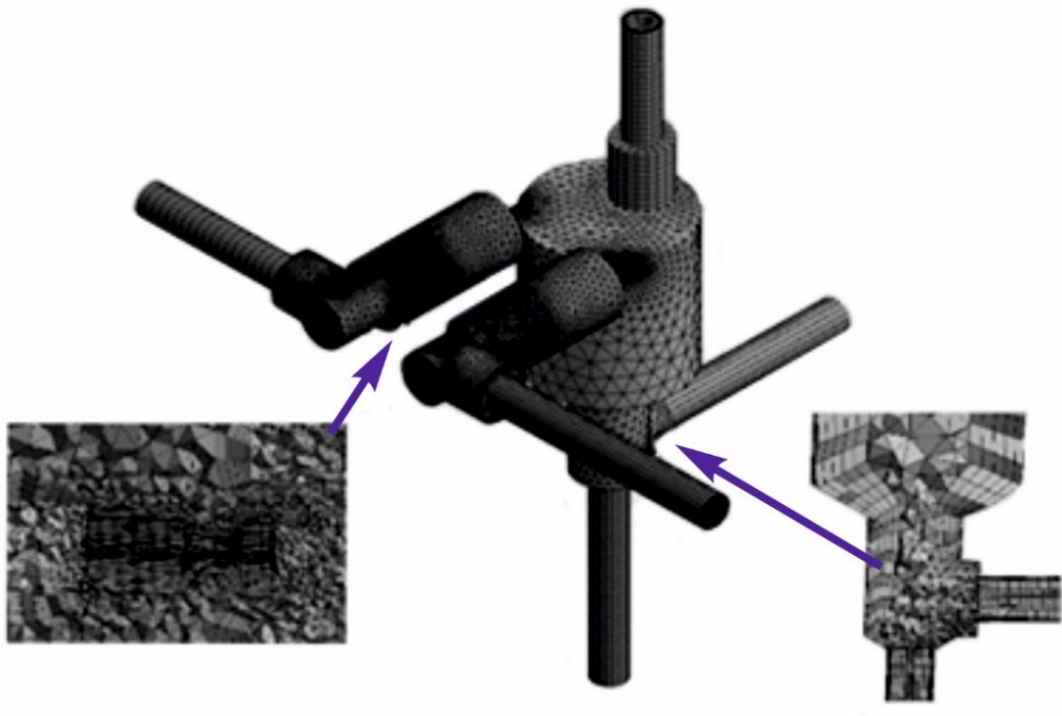


Рисунок 2.19 – Скінчено-елементна модель змішувача генератора газової суміші

газової суміші зі стінками сопла має дуже вагомий вплив на параметри газодинаміки течії при перетіканні через отвори з критичним перерізом, тому у відповідних зонах проведено моделювання теплообміну компонентів газової суміші зі стінками сопел (рис. 2.19). Розрахунки проведені у стаціонарній постановці.

Для опису процесу сумішоутворення прийнято модель однофазного багатокомпонентного потоку. Для розрахунку складу газової суміші застосовані рівняння [88]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = 0, \quad (2.29)$$

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \operatorname{div} \mathbf{P} + \vec{f}, \quad (2.30)$$

$$\rho \frac{de}{dt} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \mathbf{P} \cdot \operatorname{grad} \vec{u}, \quad (2.31)$$

$$\rho \frac{\partial c_i}{\partial t} = -\operatorname{div} \vec{I}_i, \quad i = 1, \dots, N-1, \quad (2.32)$$

де $\rho(\rho_i)$ – густина суміші та її компонентів i ;

c_i – масова концентрація компонентів i ;

\mathbf{P} – тензор напружень;

\vec{u} – вектор швидкості;

$\vec{I}_i = \rho_i \vec{w}_i$ – вектор дифузійного потоку;

λ – коефіцієнт теплопровідності газу;

T – температура газу;

e – внутрішня енергія газу.

У визначенні вектора дифузійного потоку в моделі не враховувалися ефекти термо- та бародифузії. Таким чином швидкості дифузії в (2.32) задавалася законом Фіка [67]:

$$\vec{w}_i = -D_i \operatorname{grad} c_i, \quad (2.33)$$

де D_i – коефіцієнт дифузії компонентів i в суміші із N компонентами.

У даному випадку враховується вплив дії об'ємних сил \vec{f} (гравітація) для врахування можливості розшарування газової суміші, а саме компонентів різної густини. Під час розрахунку газової константи та щільності суміші використано стандартні правила змішування:

$$\frac{1}{\rho} = \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{\rho_i}, \quad R = \sum_{i=1}^N c_i R_i \quad (2.34)$$

Математичну модель (2.29) – (2.34) доповнює рівняння SST моделі турбулентності [87]. Вибір такої моделі дозволяє врахувати особливості течії, які важливі для аналізу складу паливної суміші в об'ємі камери і в пристінкових шарах, особливо в порожнинах оброблюваної деталі.

Ступінь гомогенності газової суміші визначено як:

$$\vartheta = \frac{\sigma C_n}{[C_n]}, \quad (2.35)$$

де $[C_n]$ – задана молярна концентрація палива, зазвичай, відповідна стехіометричному співвідношенню;

σC_n – найкращий показник середнього квадратичного відхилення молярної концентрації паливної суміші, який визначається виразом:

$$\sigma C_n = \sqrt{\sum_N (C_{nk} - MC_n)^2 \bar{V}_k}, \quad (2.36)$$

де MC_n – математично-очікувана молярна концентрація паливної суміші (2.37).

$$MC_n = \sum_N \bar{V}_{nk} C_{nk} \quad (2.37)$$

Початковим кроком для розв'язку рівнянь за часом встановлено 1×10^{-4} секунди, проте потім його збільшено до 1×10^{-3} секунди. Обрано схему за часом: Second Order Backward Euler. Інше – High Resolution.

Для визначення залежності розрахункових параметрів процесу за часом використано мову CEL, де оцінка якості змішування газової суміші в потоці (2.35) на виході зі змішувача визначено як:

$$\frac{\sqrt{\text{areaAve}(\text{areaAve}(\text{CH4IdealGas.MolarFraction})@Outlet) - \text{CH4IdealGas.MolarFraction}^2 @Outlet}}{\text{areaAve}(\text{CH4IdealGas.MolarFraction})@Outlet} \quad (2.38)$$

Згідно з визначеними вище завданнями проведено числове експериментальне дослідження під час якого отримані поля швидкостей потоку, масові витрати компонентів паливної суміші через сопла змішувача, поля температури й тиску.

На рис. 2.20 і рис. 2.21 представлено поля тиску та температури в перетині змішувача та в соплах. За результатами моделювання спостерігається невелике підвищення температури (20 – 22,3° C), що виникає через надлишковий тиск перед соплами. Але вже після сопел спостерігаємо істотне локальне зниження температури спричинене значним прискоренням потоку газу через істотне локальне падіння тиску та надкритичним режимом течії (рис. 2.22).

На точність дозування компонентів газової суміші, безумовно, впливають неоднорідні умови течії, які мають урахуватися під час виконання розрахунків. Для точнішого прогнозування витрат компонентів газової суміші в критичних зонах виконано моделювання в умовах пов'язаного теплообміну з металевими частинами в конструкції змішувача.

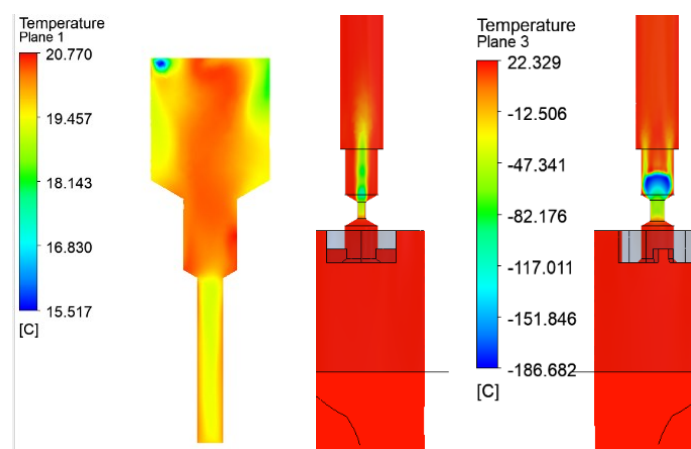


Рисунок 2.20 – Поля температури у центральному перерізі на змішувачі та на соплах

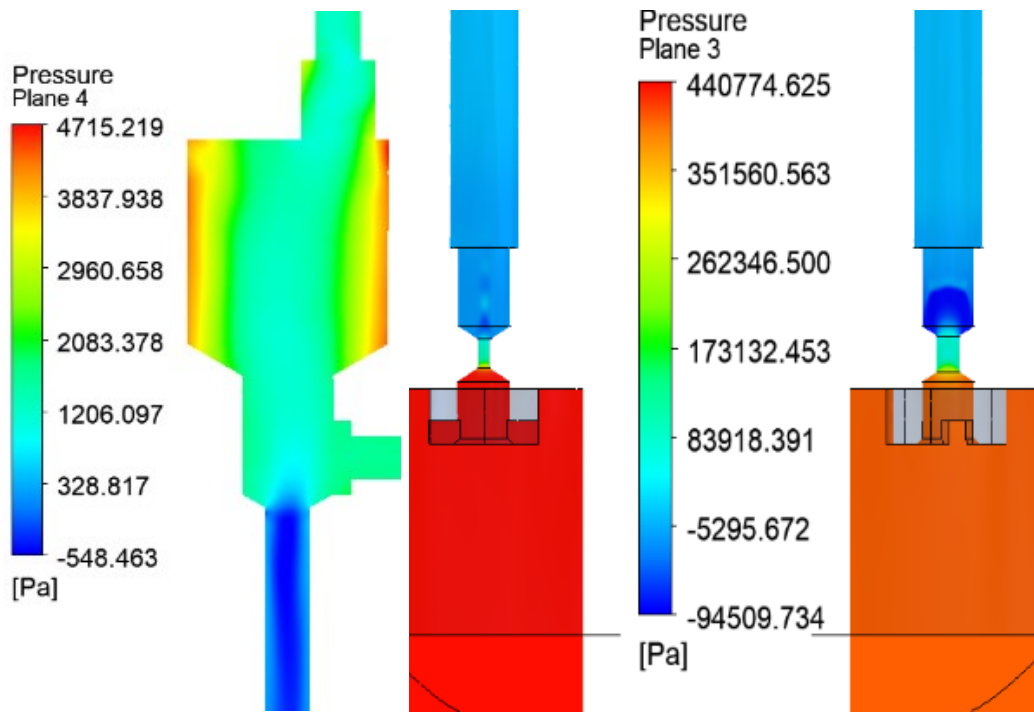


Рисунок 2.21 – Поля тиску у центральному перерізі змішувача та на соплах

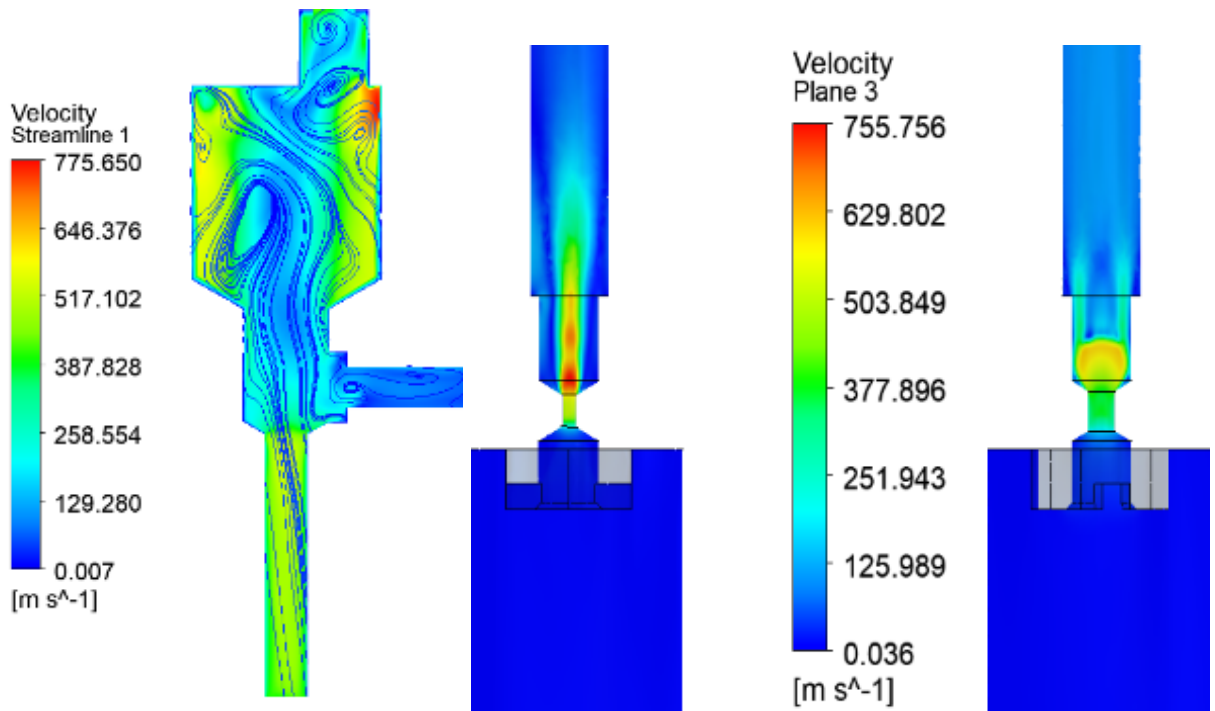


Рисунок 2.22 – Поле швидкості у центральному перерізі змішувача та на соплах

Отримане розподілення коефіцієнта теплопередачі в суміжних з соплами зонах показано на рис.2.23.

На рис. 2.24 показано поле розподілення молярної концентрації в газовій суміші компонента метану в перетині виходу зі змішувача.

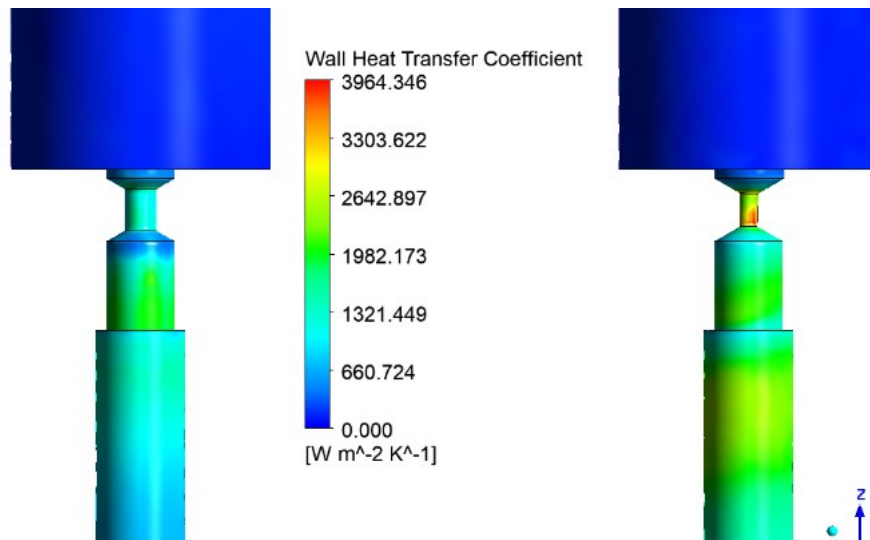


Рисунок 2.23 – Коефіцієнт теплопередачі на соплах

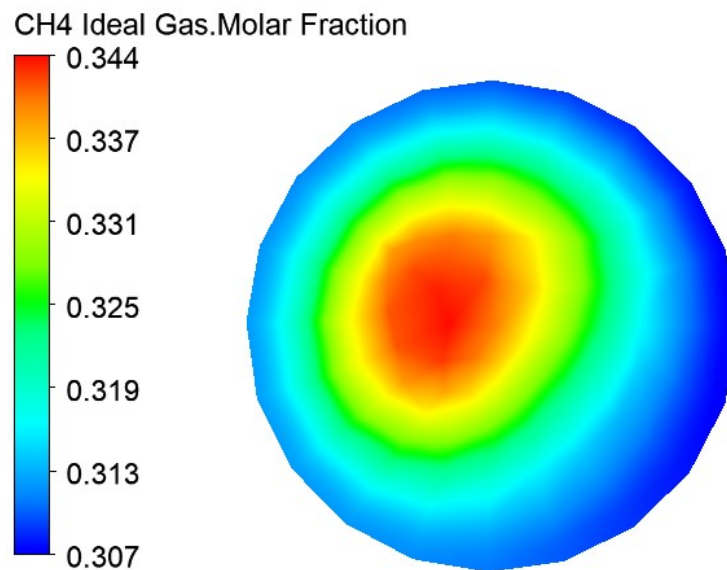
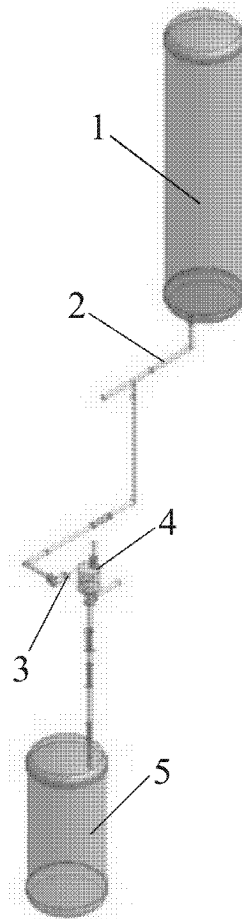


Рисунок 2.24 – Молярна концентрація метану в перетині виходу зі змішувача

Аналіз результатів отриманих газодинамічних параметрів течії в розробленій конструкції змішувача дозволяє встановити, що гомогенна суміш утворюється з 3 % середньоквадратичним відхиленням молярної концентрації в газовій суміші компонента метану [23].

2.3.3 Моделювання наповнення камери

Моделювання процесу, що досліджується, виконано за методом кінцевих елементів, реалізованим у програмі ANSYS Fluent [65]. Розрахункову 3D-модель та підсистеми подано на рис. 2.25.



1 – ресивер (проміжний резервуар); 2 - трубопровід;
3 – форсунка; 4 – змішувач; 5 – камера

Рисунок 2.25 – 3D-модель блоку наповнення компонентом газової суміші

Детально аналогічну кінцево-елементну модель, визначальні рівняння та налаштування вирішувача описано в пункті 2.3.1 (формули (2.19) – (2.28)). Для розрахунків вихідними даними для N_2 прийняті значення: $M = 28,0134 \times 10^{-3}$ кг/Моль, $\rho = 1,251$ кг/м³, $R = 297$ Дж/(кг·К), $k = 1,34$.

У ресивері і резервуарі прийняті початкові значення тиску відповідно 0,5 МПа і 0,1 МПа. Початкова температура в системі – 288 К. Діаметр отвору в соплі – 1 мм. Об'єм резервуара – $15 \times 10^{-3} \text{ м}^3$. Час перетікання газу – 10 с [71].

Основними термодинамічними параметрами за період наповнення нестационарної газодинамічної течії визначено: зміну тиску в контрольній точці в об'ємі резервуару за часом наповнення (рис. 2.26); зміну температури в контрольній точці в об'ємі резервуару за часом наповнення (рис. 2.27); неоднорідний розподіл температури газу в об'ємі (рис. 2.28) і відхилення в контрольній точці поточної температури газу від осередненої в об'ємі (рис. 2.29); зміна маси компонентів суміші в резервуарі за часом наповнення (рис. 2.30) [40].

Для визначення залежності розрахункових параметрів процесу за часом використано мову CEL. Відхилення в контрольній точці поточної температури газу від осередненої в об'ємі визначено залежністю:

$$\Delta(t) = 100\% \times \left(\frac{T(t)@Point - \text{volumeAve}(T(t))@Reservoir}{\text{volumeAve}(T(t))@Reservoir} \right) \quad (2.39)$$

Числова модель процесу перетікання газу з проміжної ємності до камери дозволяє одержати якісну картину роботи системи.

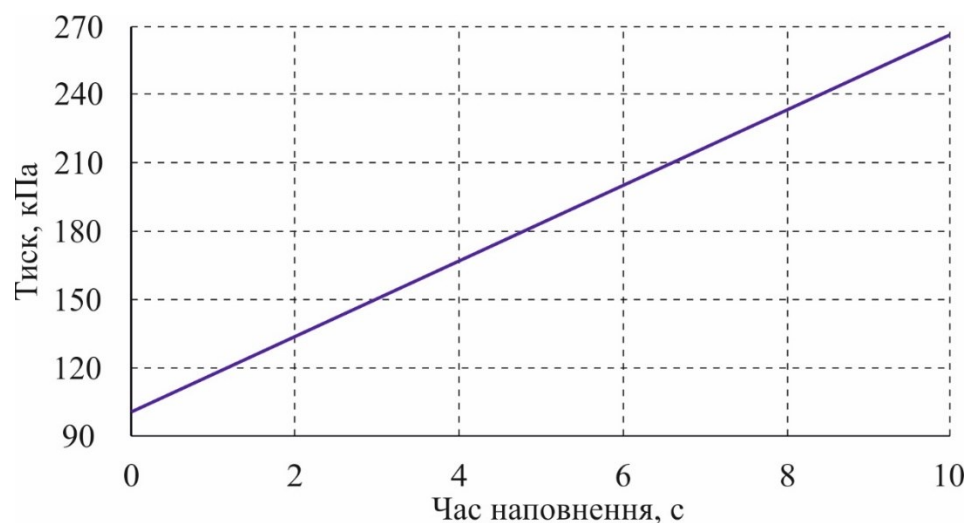


Рисунок 2.26 – Змінення тиску в ємності за часом

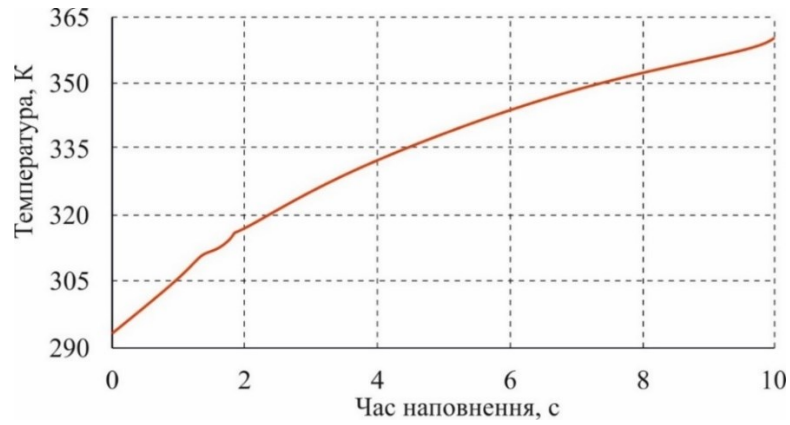


Рисунок 2.27 – Змінення в контрольній точці температури газу в об'ємі резервуару за часом наповнення

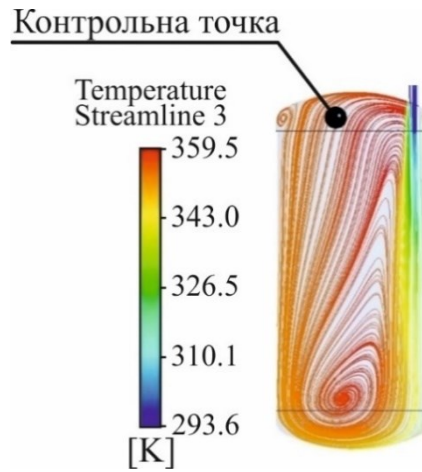


Рисунок 2.28 – Лінії рівня температури газу в момент наповнення ємності



Рисунок 2.29 – Відхилення в контрольній точці поточної температури газу від осередненої в об'ємі

У розрахунковому об'ємі в процесі наповнення маса газу визначається інтегруванням густини газу:

$$m(t) = \text{volumeInt}(\rho(t)) @ \text{Volume}. \quad (2.40)$$

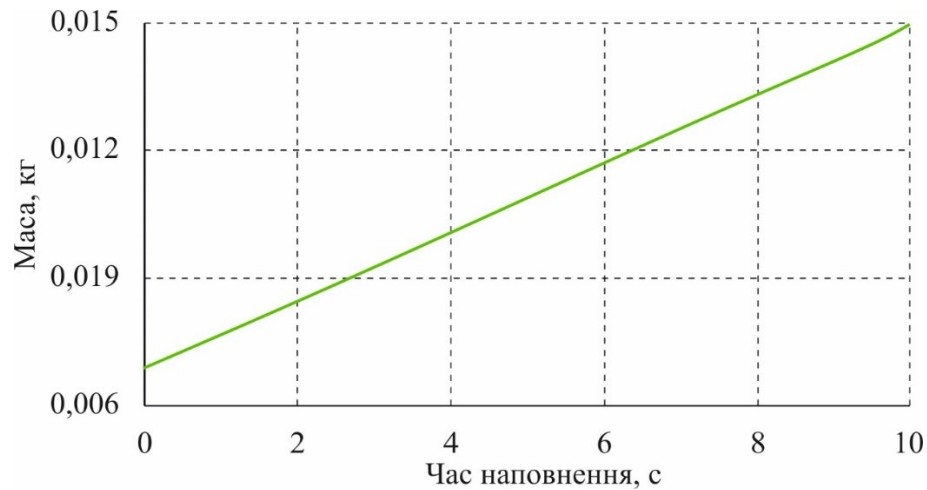


Рисунок 2.30 – Зміна маси газу за часом наповнення

Числове моделювання газодинамічного процесу утворення суміші із заданим компонентним складом під час перетікання через змішувач у системі генерації газової суміші виконано за методом кінцевих елементів з використанням програми ANSYS Fluent для визначення параметрів масової витрати компонентів газової суміші, швидкостей газового потоку та поля температури і тиску.

2.4 Перспективи подальшого удосконалення запропонованого методу на базі використання технології цифрових близнюків

Беручи до уваги складність процесів, які протікають при наповненні газовими сумішами робочої камери, застосування на базі поєднання числових й аналітичних моделей та даних натурних експериментів цифрових близнюків є найперспективнішим напрямом повної автоматизації означених технологій [18].

Існує кілька методів створення цифрових близнюків процесів, проте їхнім спільним аспектом є принцип оброблення та порівняння інформації, яка надходить з віртуальних датчиків цифрового близнюка, з існуючими даними датчиків вимірювання параметрів процесу. Цифровий близнюк, окрім загального управління процесом, дозволяє виявляти та запобігати порушенню звичного перебігу процесу або роботи устаткування, встановлювати фактори їх виникнення. Праця цифрового близнюка може організовуватися в режимах онлайн або офлайн. Цифрові близнюки також можуть бути використані для аналізу результатів різноманітних стратегій управління. Створення цифрових близнюків процесів сприяє швидкому переналагодженню системи для конкретних завдань з автоматичним визначенням оптимальних режимів для досягнення прогнозованої точності оброблення [74, 69, 61, 66, 71, 18, 40].

У перспективі здійснення зіставлення роботи цифрового близнюка з устаткуванням, оцінювання точності початкових параметрів числових експериментів та натурних, його інтеграція в систему автоматизованого управління процесом сумішеутворення.

Висновки до розділу 2

1. Запропоновано вдосконалений метод критичних отворів для генерації багатокомпонентних газових сумішей за рахунок подачі компонентів з посудин регульованих об'ємів, величини яких розраховуються, виходячи з умови забезпечення рівності змін температур газів у посудинах у процесі перетікання в однаковий момент часу, що дозволяє забезпечити похибку дозування компонента паливної суміші за масою на рівні до 0,1 %.

2. Уперше сформульовано математичну модель для визначення об'ємів та початкового тиску в посудинах з компонентами газової суміші для запропонованого варіанту методу критичних отворів, що дозволяє забезпечувати задане масове співвідношення компонент у посудині з сумішшю без додаткового регулювання з теоретичною точністю дозування компонентів на рівні порядку 0,01 %.

3. Розроблено числові моделі складових елементів удосконаленої системи генерації газових сумішей: наповнення проміжних ємностей, перетікання газової суміші через критичні отвори з подальшим їх перемішуванням, перетікання газу з проміжної ємності до імітатора камери через розроблений змішувач із соплами.

4. Визначено, як урахування теплообміну зі стінками ємності впливає на параметри суміші, що досліджуються, а саме: тиск; масу компонента суміші; температуру в контрольній точці; температуру газу, осереднену за об'ємом.

5. Проведено оцінку змішувача системи генерації газової суміші, зважаючи на можливість створення за введеним показником гомогенної паливної суміші. Для прецензійного термоімпульсного оброблення газовими сумішами обґрунтована похибка якості суміші 0,1 %.

6. Перспективним напрямом використання розроблених моделей є їх застосування для побудови цифрових близнюків систем генерації сумішей на базі запропонованого методу, в яких закони управління роботою систем мають корегуватися з урахуванням даних онлайн моніторингу технологічних параметрів від вбудованих датчиків.

Основні наукові результати, наведені в другому розділі, опубліковано в роботах автора [61, 71, 73, 90, 1, 18, 20, 23, 40, 41, 50, 51, 57, 58].

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ВИТІКАННЯ ГАЗІВ З ПРОМІЖНИХ ЄМНОСТЕЙ ТА НАТІКАННЯ ГАЗІВ У КАМЕРУ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ

3.1 Визначення коефіцієнтів витрат сопел

Окрім похибок, що можуть виникнути через відмінності контуру фактичного отвору з теоретичним профілем на коефіцієнт витрати сопел впливатимуть: втрати на удар у звуженій частині сопла перед критичним перетином, нерівномірне поле густини і непаралельний потік у вузькому перетині, через тертя в мінімальному перетині сопла.

За надкритичного перепаду тиску миттєве значення масової витрати з отвору з критичним перерізом визначається формулою (2.5), а поточні величини тиску та температури виразами (2.6), (2.7) відповідно. Згідно з методикою, описаною в праці [39], визначатимемо коефіцієнти витрат на основі залежності (2.6), звідки:

$$\frac{P}{P_0} = (1 + Bt \cdot)^{\frac{-2k}{k-1}}, \quad (3.1)$$

звідси

$$\mu = \frac{\left[\left(\frac{P_i}{P_0} \right)^{-(k-1)/2k} - 1 \right]}{t_i} \frac{2V}{\psi(k-1)F\sqrt{RT_0}}, \quad (3.2)$$

де P_i – отримана вимірюванням величина тиску в ємності в момент часу t_i ; T_0, P_0 – початкові значення температури та тиску в ємності.

Як зазначено в роботі [39], під час визначення коефіцієнту витрати вимірювання рекомендується проводити в діапазоні часу 0,5...1,0 с, це гарантує наближені умови адіабатичного витікання газу. Зазначений вибір обумовлено тим, що за такої тривалості характерна товщина прогрівання газу вздовж стінок посудини $\delta \cong \sqrt{at}$, де a – температуропровідність газу, не

перевищує 2...3 мм. Ґрунтуючись на тому, що процес витікання відбувався за високих перепадів тиску, цей прошарок за товщиною не перевищував 1,5 % діаметру посудини, що дає змогу розглядати процес витікання як адіабатичний. При цьому сопла, які досліджували, приєднували до ємності зі задалегіть визначеним об'ємом. Посудину наповнювали газом до досягнення тиску у 2,0 МПа. Площина перерізу трубопроводу перевищувала більше ніж у 10 разів площину критичного перерізу отвору сопла. За надкритичного витікання газу вимірювали тиск у ємності. При цьому потрібно врахувати: в електромагнітних клапанах, що використовуються в газових трактах, є індивідуальні характеристики часу спрацьовування, а при відкриванні клапанів до положення, коли площа каналу клапана менша за площу отвору в соплі, умови надкритичного перетікання досягаються саме в клапанах. Це, разом з наявністю перехідних процесів у газових трактах тривалістю не більше 0,4...0,5 с [59], додає похибку під час розрахунку коефіцієнта витрати за формулою (3.2) у разі, якщо при розрахункові використовують початкову температуру газу.

Для точнішого вимірювання його слід проводити, коли перехідні процеси досягли умови затихання. Зважаючи на вищенаведені дані, початком проведення вимірювання встановимо час $t = 0,5$ с. Відповідно до цього залежність (3.2) для розрахунку коефіцієнту витрати можемо записати у вигляді:

$$\mu_i = \frac{\left[\left(P_i / P_{0,5} \right)^{-(k-1)/2k} - 1 \right]}{t_i} \frac{2V}{\psi(k-1)F\sqrt{RT_{0,5}}}, \quad (3.3)$$

де $P_{0,5}, T_{0,5}$ – виміряні величини тиску та температури газу в ємності на момент, коли $t = 0,5$ с, а коефіцієнт витрати визначається середнім арифметичним від значень, розрахованих за залежністю (3.3), у якій використовуються виміряні значення тиску P_i у моменти часу t_i :

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i}{N}. \quad (3.4)$$

де N – кількість замірювань тиску у зазначеному діапазоні тривалості витікання.

За частоти вимірювань датчика тиску 1000 Гц кількість вимірювань, яка враховуватиметься у виразі (3.4) упродовж 0,5 секунди, складатиме $N = 500$, що є цілком достатнім для врахування випадкових похибок.

Ураховуючи, що час наповнення робочої камери в процесі генерації паливної суміші може займати до 10 с, виконання умов адіабатичного перетікання, зазначених вище, неможливе для зазначеного часу перетікання газів. Зважаючи на це, змінення температури й пов'язане з цим змінення в'язкості газу може вплинути на величину коефіцієнта витрати. З метою перевірки можливості застосування (3.3) упродовж усього часу генерації суміші слід провести додаткові експерименти.

Після визначення коефіцієнта витрат у першій серії вимірювань виконується циклічне випускання газу з ємності, проводиться витримка для виконання умови $P_2/T_2 = const$, після цього здійснюється чергове вимірювання коефіцієнта витрат з новою величиною початкової температури. При цьому слід ураховувати необхідність умови забезпечення надкритичного перетікання (перепад тиску) при визначенні кількості таких циклів. Отже, коефіцієнт витрат може встановлюватися як функція від температури.

Зважаючи на залежність перетікання газу через отвір з критичним режимом остаточний порядок визначення коефіцієнтів витрат сопел містить такі етапи.

1. Визначення площ критичних отворів у соплах.
2. Визначення об'ємів елементів у газових трактах.
3. Циклічне продування проміжних.
4. Відбір проб газу з ємностей для визначення їх компонентного складу.
5. Визначення характеристик газів отриманого компонентного складу.

6. Розрахунок коефіцієнтів витрат у соплах при вільному витіканні газових компонентів в атмосферу за описаною методикою.

7. Статистичний аналіз отриманих результатів.

Установивши всі зазначені параметри в довільний інтервал часу в посудині за вимірюваним тиском та температурою, можна встановити масу газу, яка витікла з неї:

$$m_{\text{sum}} = \int_0^t \frac{\mu(T)FP}{\sqrt{RT}} \psi dt. \quad (3.5)$$

3.2 Визначення площин поперечних перерізів отворів у соплах

Для забезпечення надкритичного перетікання на вході до камери змішувача, що розроблений у підрозділі 2.1 (рис. 2.2), установлені сопла (рис. 3.1 б), отвори в яких потребують калібрування. При будь-якій технології виготовлення отвори в соплах матимуть відхилення від розрахованих за формою і розмірами, що в подальшому впливає на точність визначення масової витрати під час перетікання через них. Щоб визначити фактичні форму і розміри отворів у соплах, використовуватиметься інструментальний мікроскоп із цифровою шкалою БМІ-1Ц (ціна поділки 0,0001 мм) (рис. 3.1 а).

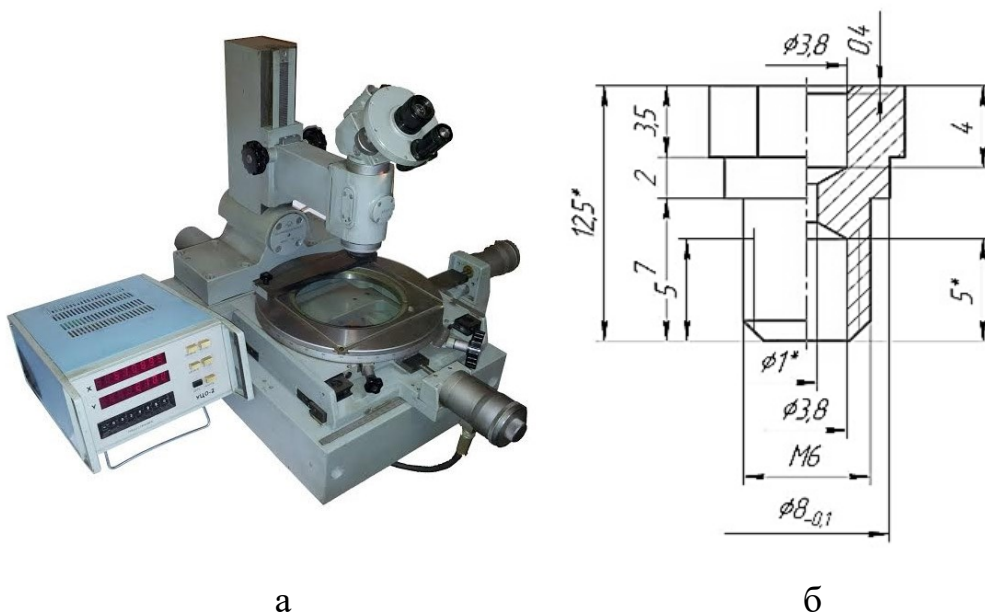


Рисунок 3.1 – Мікроскоп БМІ-1Ц (а) та типове сопло змішувача (б)

Вимірювання та наступні розрахунки для визначення площин отворів у соплах виконані за такою методикою.

1. Установити поперечним перетворювачем горизонтальну лінію перехрещування сітки і відповідної штрихової лінії без зазора по вершині профілю отвору. Зареєструвати перше значення.

2. Змістити поперечний перетворювач на протилежну сторону профілю отвору і так само встановити горизонтальну лінію сітки по вершині профілю. Зареєструвати друге значення.

3. Розрахувати розмір, як різницю отриманих значень.

4. Повторити вимірювання за п. 1 – 3 цієї методики для отримання розміру отвору в перпендикулярному напрямі до попереднього.

5. За отриманими розмірами h_{max} і h_{min} отвору у двох перпендикулярних перетинах слід побудувати профіль фактичного отвору. Для цього отримане фактичне значення h_{max} зазначити як діаметр кола та побудувати його. Після чого провести стиснення контура кола за напрямком, перпендикулярним лінії найбільшого вимірюваного розміру з коефіцієнтом $\sigma = h_{max}/h_{min}$ (рис. 3.2).

6. Визначити площину отриманого контура отвору.

Розраховане таким чином значення використовуватиметься як площа критичного перерізу отвору відповідного сопла. Отримані за наведеною вище методикою значення площин отворів сопел, які встановлені в змішувачі, внесено до табл. 3.1.

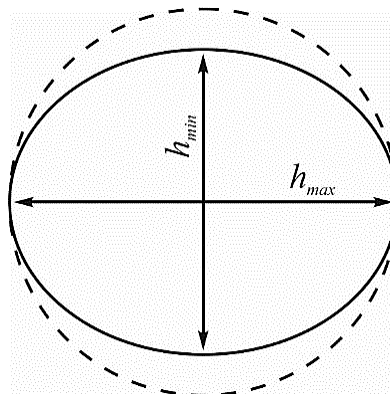
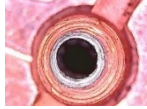



Рисунок 3.2 – Схема побудови контура критичного отвору за результатами вимірювань

Таблиця 3.1 – Результати дослідження отворів у соплах

Діаметр номінальний, мм	h_{min} , мм	h_{max} , мм	Фотографія	Площина, мм ²
1,75	1,7478	1,7487		2,400474
1	1,0750	1,0802		0,912016

3.3 Вимірювання об'ємів ємностей

Основна ідея запропонованого способу генерації паливної суміші для термоімпульсного обладнання [1] полягає в динамічному сумішоутворенні за надкритичного витікання компонентів з проміжних ємностей (рис. 2.1), у яких об'єм змінюють, наприклад, переміщенням поршня. Управління процесом сумішоутворення здійснюється за станом газів у проміжних ємностях. Для цього в зазначених ємностях відбувається постійний моніторинг температури та тиску газів за допомогою відповідних датчиків. Щоб забезпечити точність дозування компонентів суміші, які подаються до робочої камери, слід визначати з високою точністю об'єми елементів газового тракту, щоб врахувати частки газу, які в процесі перетікання із сумішоутворенням залишаються в трубопроводах та технологічних об'ємах. Ці елементи мають достатньо складну форму і, як зазначалося, об'єм проміжних ємностей може змінюватися, що потребує використання засобів контролю об'єму посудин, які застосовуються, що забезпечувало б високу швидкість і точність вимірювання.

Для визначення цих даних, які необхідні в управлінні процесом генерації паливної суміші, потрібен демонтаж системи. Отже, щоб зменшити кількість монтажних робіт для підготовки експериментів передусім необхідно визначити об'єми всіх елементів газового тракту (ємності, ділянки трубопроводів та внутрішні об'єми клапанів). Найпростіший варіант

визначення означених величин – зважування за допомогою лабораторних ваг елементів газового тракту, порожніх та заповнених дистильованою водою. При цьому в разі відхилення температури в навколишньому середовищі від 20°C необхідно враховувати зміну густини рідини, застосовуючи градууювальні таблиці [14]. Об'єм кожного елемента газового тракту вираховується за результатом зважування, використовуючи вираз:

$$V = \frac{m_e - m_n}{\rho_e(T)}, \quad (3.6)$$

де m_e – маса елемента газового тракту, заповненого водою; m_n – маса порожнього елемента газового тракту; $\rho_e(T)$ – густина води за температури навколишньої середовища.

Щоб зменшити похибку визначення маси зважування на електронних лабораторних вагах, необхідно його виконувати 7...10 разів з однаковим розположенням на зважувальній платформі. У такому разі для розрахунку об'єму за виразом (3.6) значення маси потрібно взяти як середнє арифметичне за результатами всіх вимірювань.

Головним недоліком вагового способу вимірювання є необхідність заповнювати вимірювані об'єми рідиною, що збільшує похибку вимірювань через необхідність очищувати (осушувати) посудину від рідини після замірів. Окрім цього, процедура ускладнюється через наповнення і видалення рідини з вимірюваної ємності, тому збільшується тривалість проведення вимірювань. Похибки визначення об'ємів за формулою (3.6) виникають також через те, що вимірювані величини (маси елемента газового тракту або ємності) належать до розрахункової формули як абсолютні величини, це не дає змогу компенсувати систематичну похибку зважування та вимагає застосування ваг з високим класом точності. Також високоточне зважування ускладнене тим, що ємності та елементи газового тракту, які вимірюються, мають об'єми, що, зазвичай, відрізняються на порядок. Це спричиняє необхідність високоточного вимірювання мас, які різняться в десятки разів, що потребуватиме використання ваг із різними вимірювальними діапазонами. Під

час вимірювання ємностей (наприклад, елементи газового тракту або запропонований газовий змішувач), що мають складну форму, при використанні зазначеного способу виникають труднощі із запобіганням утворення газових карманів, які не дозволяють повністю заповнювати рідиною вимірюваний об'єм.

Для усунення виявлених недоліків у проведенні вимірювань об'єму потрібно здійснювати їх за допомогою газового середовища. Для цього, у переважній більшості практичних випадків, може застосовуватися рівняння стану ідеального газу, згідно з яким через змінення тиску для різних об'ємів можливо розрахувати вимірюваний об'єм посудини. У патенті [48] розглянуто спосіб вимірювання об'єму посудини V_0 , суть якого в тому, що об'єм ємності, що вимірюється, змінюють на відому величину ΔV , визначаючи зміну тиску газу в посудині перед зміною об'єму та після. За отриманими даними визначають об'єм посудини V_0 , який відрізняється тим, що, попередньо вирівнюючи тиск у герметичній ємності з тиском навколишнього середовища, переміщуючи стержень, змінюють об'єм посудини на величину ΔV_1 та вимірюють тиск ΔP_1 усередині ємності щодо зовнішнього середовища, упевнившись, що тиск не змінюється впродовж певного часу, змінюють об'єм ємності на величину ΔV та вирівнюють тиск у посудині з тиском навколишнього середовища. Ще раз змінюється об'єм ємності на величину ΔV_2 та заміряється тиск ΔP_2 в посудині відносно зовнішнього середовища, повторно впевнившись у його незмінності впродовж певного часу, а об'єм посудини V_0 розраховують за виразом:

$$V_0 = \frac{\Delta V k \Delta P_2 / \Delta V_2}{(\Delta P_2 / \Delta V_2 - \Delta P_1 / \Delta V_1)}, \quad (3.7)$$

де $k = 1$, коли об'єм ємності зменшують, та $k = -1$, коли збільшують.

Недосконалість цього способу в необхідності суттєвого змінення величин об'ємів ΔV_1 і ΔV_2 з метою забезпечення більшої точності під час вимірювання великих об'ємів. Таким чином, змінення об'ємів посудин

спричинить змінення температури газу. У цьому способі вимоги до проведення вимірювань по встановленню постійного тиску забезпечуються тільки за умови режиму сталої температури завдяки теплообмінові між оточуючим середовищем, ємністю і газом усередині неї, це потребує багато часу, урахувуючи низьку теплопровідність газів.

Також існують інші способи визначення об'єму замкнутих посудин, що ґрунтуються на вимірюванні параметрів витікання газу. Наприклад, у [49] розглянуто спосіб вимірювань об'ємів великогабаритних оболонок, у якому запропоновано створювати в ній технологічне каліброване витікання, під'єднавши прилад вимірювання абсолютного тиску всередині великогабаритної оболонки, заповнивши цю оболонку повітрям до надлишкового тиску, та виміряти час зменшення тиску в ємності через зазначене витікання на заздалегідь задану величину зменшення тиску. Після чого в оболонці створюється друге каліброване витікання з іншою витратою, удруге наповнюється ємність повітрям з таким самим надлишковим тиском та вимірюється час зменшення тиску через друге витікання, після цього визначається обсяг оболонки.

Недосконалість цього способу – незначна точність вимірювання, зумовлена таким: упродовж вимірювання параметрів газового середовища всередині об'єму, що вимірюється, зокрема, змінюється температура, яка впливає на умови витікання і спричиняє неконтрольовану похибку результатів вимірювання. Окрім цього, спільний недолік зазначених способів – значна тривалість процесу вимірювання, що може сягати декількох годин. Стосовно способів вимірювання параметрів докритичного перетікання, їх спільний недолік – необхідність використання пристроїв вимірювання витрат, що вносять додаткову похибку в кінцевий результат визначення об'єму.

Цей недолік відсутній у способах, при яких використовується надкритичне перетікання газу з вимірюваної посудини. Існує спосіб вимірювання об'єму, що ґрунтується на заповненні вимірюваної й еталонної посудин газом до рівня початкового підвищеного тиску, його послідовному

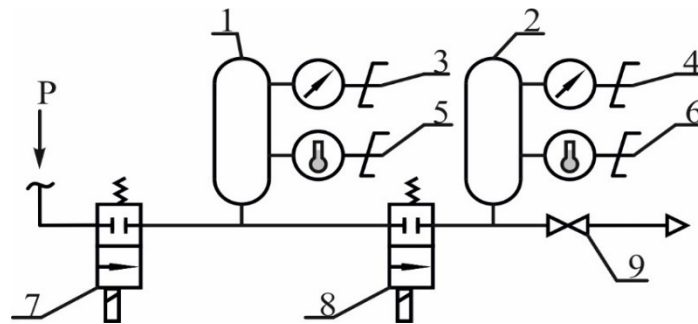
випусканні з кожної посудини за надкритичного витікання, вимірюванні часу зменшення тиску в кожній ємності на задану величину і розрахункові об'єму вимірюваної ємності за отриманими даними [22]. Недосконалість зазначеного способу – низька точність і тривалі вимірювання. Це викликано тим, що за надкритичного витікання температура газу в ємностях суттєво змінюється, що спричиняє похибки у визначенні витрат газу. Упродовж витікання можливо, що температура буде розподілятися нерівномірно всередині ємності, результатом цього буде неконтрольована похибка, яка впливає на точність розрахунку вимірюваного об'єму посудини. Збільшений час вимірювань при зазначеному способі, спричинений необхідністю численного дренажу газу з кожної ємності з метою забезпечення точних розрахунків об'єму. Але контроль об'єму ємності в запропонованому способі генерації газової суміші має бути оперативним, тому способи, основані на зміні об'єму на відому величину та на надкритичному витіканні, слід удосконалювати.

3.3.1 Удосконалення вимірювання об'єму посудини через зміну її об'єму на відому величину

Удосконалення вимірювання об'єму посудини вирішується тим, що об'єм цієї посудини змінюється на величину ΔV і визначається змінення тиску газу в ній до та після зміни її об'єму, на підставі отриманих даних розраховується об'єм ємності V_0 . Посудина, що вимірюється, попередньо наповнюється підготовленим повітрям або газом (далі – газ), після чого змінення об'єму цієї посудини здійснюється її під'єднанням до еталонної ємності із заздалегіть встановленим об'ємом ΔV , під час наповнення та при витіканні газу з посудини, що вимірюється, визначається його тиск P і температура T після досягнення сталого співвідношення P/T .

Спосіб [48] реалізується наступним чином (рис. 3.3). Еталонна ємність 2 із заздалегіть встановленим об'ємом ΔV під'єднується до посудини 1, що вимірюється, за допомогою електромагнітного клапана 8. При цьому всі

елементи газового тракту заповнені газом. У посудину 1, що вимірюється, подається стислий газ. У цій посудині водночас змінюється тиск та температура, що вимірюють за допомогою датчиків 3, 4 і 5, 6 відповідно.



- 1 – посудина, що вимірюється; 2 – еталонна ємність;
 3, 4 – датчики температури; 5, 6 – датчики тиску;
 7, 8 – електромагнітні клапани; 9 – вентиль

Рисунок 3.3 – Схема під'єднання еталонної ємності до посудини, що вимірюється

Зазначені зміни відбуваються як у процесі наповнення ємності стислим газом, так і після закінчення його подачі та продовжуються до встановлення рівноваги температур між частинами конструкції газової системи, газом усередині неї і навколишнім атмосферним повітрям. Зазначений процес залежить від характеристик теплопровідності повітря та може відбуватись упродовж тривалого часу. Проте при проведенні вимірювань у встановленні зазначеної рівноваги немає потреби. Для цього достатньо встановити сталі показники, які визначають масу газу в газовому тракті. Грунтуючись на рівнянні стану ідеального газу $PV = mRT$, необхідно досягнути умови $P/T = const$. Після виконання цієї умови потрібно виміряти тиск P_1 і температуру T_1 у довільний момент. Наступним етапом електромагнітний клапан, який з'єднує вимірювану посудину й еталонну ємність, відкривається і газ із посудини, що вимірюється, перетікає до еталонної ємності. Після повторного досягнення сталого відношення P/T знову вимірюється тиск P_2 і

температура T_2 . Зважаючи на те, що склад і маса газу в обох вимірюваннях однакові, наступні вирази є вірними:

$$P_1 V_0 = m R_2 T_1, \quad (3.8)$$

$$P_2 (V_0 + \Delta V) = m R T_2, \quad (3.9)$$

звідси об'єм посудини, що вимірюється, можна визначити як:

$$V_0 = \Delta V \frac{P_2 T_1}{(P_1 T_2 - P_2 T_1)}, \quad (3.10)$$

де P_1, T_1 – тиск і температура в посудині, що вимірюється, після наповнення газом; P_2, T_2 – тиск і температура в посудині, що вимірюється, після її під'єднання до еталонної ємності.

Через урахування одночасної зміни тиску та температури газу в посудині, що вимірюється, визначення її об'єму стає точнішим завдяки врахуванню впливання температури на тиск. Також завдяки використанню умови досягнення сталого відношення P/T непотрібно очікувати сталу температуру через теплообмін між навколишнім середовищем, посудинами та газом усередині них, що, зважаючи на низьку теплопровідність газу, істотно зменшує тривалість визначення об'єму посудини, що вимірюється. Отже, зазначене вдосконалення способу визначення об'єму ємності надає змогу збільшити точність визначення об'єму з одночасним скороченням часу вимірювань.

3.3.2 Удосконалення вимірювання об'єму за надкритичного витікання

Після того як розраховано коефіцієнт витрати сопла за методикою з підрозділу 3.1 і його приєднано до ділянки газового тракту, що вимірюється, можливим є визначення об'єму таким чином.

Ґрунтуючись на тому, що електромагнітні клапани, які застосовуються в газових трактах, можуть спрацьовувати впродовж 0,1 с, а також на наявності перехідного процесу в газових трактах, тривалість якого може сягнути 0,4 с,

для точнішого результату потрібно проводити вимірювання за умови його угамування. Ураховуючи вищезазначене, проведення вимірювання доцільно розпочати з часу $t = 0,5$ с. Для уникнення випадкових похибок у діапазоні $0,5...1,0$ с необхідно здійснити серію вимірювань, а об'єм, що визначається, розрахувати як середнє арифметичне значення:

$$V_0 = \frac{I}{N} \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{\left[\left(P_i/P_0 \right)^{-(k-1)/2k} - 1 \right]} \frac{\mu \psi (k-1) F \sqrt{RT_0}}{2} \quad (3.11)$$

За цієї умови розрахунок об'єму в посудині стає точнішим через визначення тиску впродовж зазначеного часу, зберігаючи умови адіабатичного витікання й уникнення випадкових похибок. Також процес визначення об'єму ємності, що вимірюється, обмежується часом в 1 с. Отже, спосіб [49], який пропонується, має забезпечувати точність визначення об'єму ємності за одночасного радикального зменшення часу вимірювання.

З метою перевірки принципово можливого втілення способу, що запропоновано, було використано його імітаційну модель, у якій змодельований процес визначення об'єму методом закінчених елементів [22, 62].

За описаною методикою на першому етапі розраховано коефіцієнт витрат сопла. З цією метою в САД системі було побудовано модель еталонної ємності (рис. 3.4) та визначено її об'єм, що становить $1,575 \times 10^{-3}$ м³.

До ємності приєднано короткий трубопровід із соплом, яке має форму конічного дифузора, що переходить у циліндричний фрагмент, діаметр якого становить $D = 1$ мм.

Щоб визначити параметри надкритичного перетікання для побудованої САД моделі було створено розрахункову сітку, зазначимо, що сітка мала 7 пристінкових шарів у трубопроводі й соплі, їх загальна товщина обиралася, ґрунтуючись на розрахунках можливої товщини межового шару. Щоб моделювання перетікання струменя газу із сопла було коректним, до розрахункової області додано циліндричний фрагмент (на рис. 3.4 не

відображено), на межі якої задавались умови навколишнього середовища: тиск 1 бар та температура 300 К. Із урахуванням нетривалого часу перетікання на стінках була задана умова сталої температури 300 К, а для швидкості потоку умова в'язкого прилипання. Початковими умовами в ємності було взято тиск 5 бар та температура 300 К. Для дослідження обрано газ азот, яким вся посудина була заповнена ($k = 1,404$, $R = 297$ Дж/кг·К) [62].

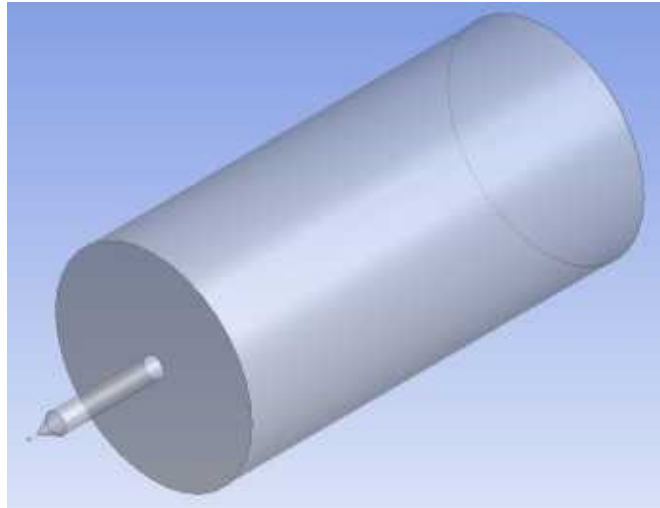


Рисунок 3.4 – Модель еталонної ємності для розрахунку коефіцієнту витрат сопла

При моделюванні використовувалися такі налаштування:

- як модель турбулентності обрано SAS SST;
- як часовий крок розв'язання прийнято адаптивний, за числом Куранта: $C < 5$;
- як часову схему застосовано second order backward Euler;
- для інших налаштувань вирішувача обрано high resolution.

На рис. 3.5 зображено графік змінення тиску в процесі надкритичного перетікання газу в еталонній ємності. Перехідні процеси відбувалися в проміжку часу до 0,1 с. Розрахований коефіцієнт витрат упродовж 0,1...0,3 с склав середнє значення $\mu = 0,753$ та має середньоквадратичне відхилення $\delta = 0,002$ [62].

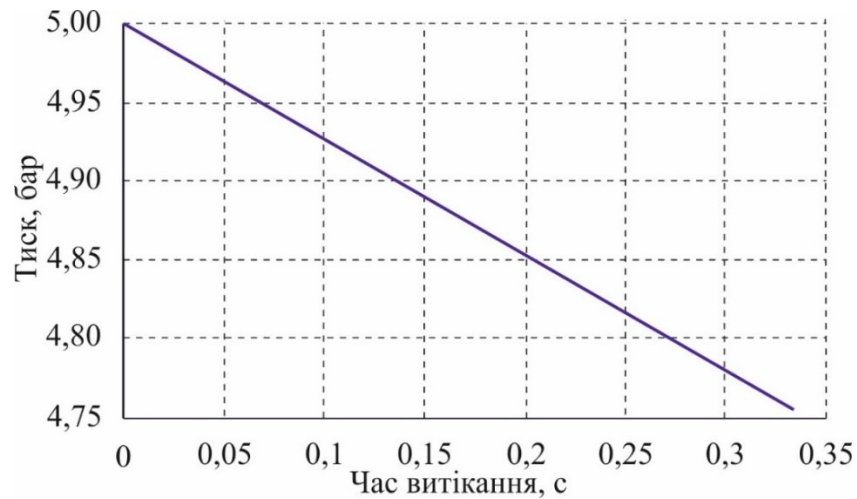


Рисунок 3.5 – Залежність тиску в еталонній ємності від часу за надкритичного витікання

На наступному етапі визначено коефіцієнт витрат, який використано при розрахунку об'єму ємності, що має складну форму (рис. 3.6). Зазначимо, що початкові та граничні умови та налаштування вирішувача були ідентичними тим, які використовувалися на попередньому етапі моделювання. Ураховуючи перехідні процеси щодо визначення об'єму ємності, використано тиск у діапазоні часу 0,1...0,3 с.

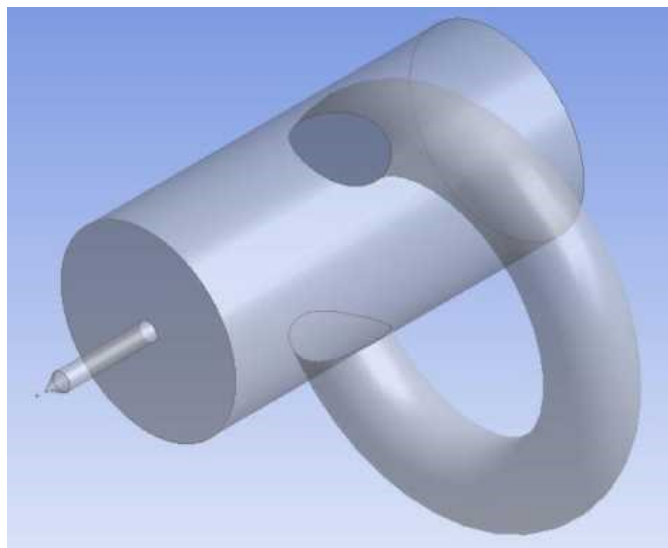


Рисунок 3.6 – Модель ємності, що має складну форму, при визначенні об'єму за надкритичного витікання

На рис. 3.7 зображено графік змінення тиску у вимірюваній ємності за надкритичного перетікання газу. За отриманими даними тиску і коефіцієнта витрат за вищенаведеною залежністю (3.11) розрахунок об'єму надає значення $V = 2,0771 \times 10^{-3} \text{ м}^3$ за величини об'єму, який визначено в CAD склав $2,0784 \times 10^{-3} \text{ м}^3$. Отже, точність визначення об'єму ємності щодо даних CAD системи сягає 0,0625 % [62].

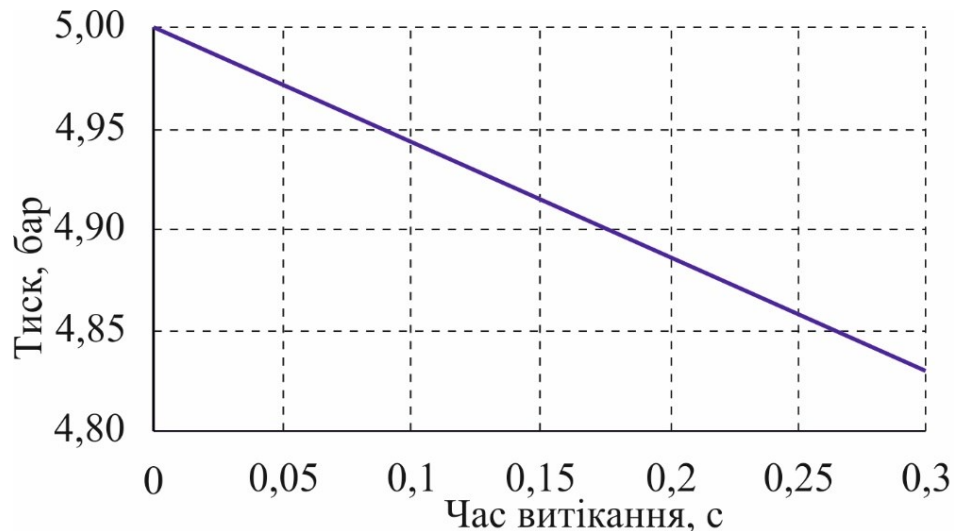


Рисунок 3.7 – Залежність тиску в ємності, що вимірюється, від часу за надкритичного перетіканні

Така значна точність зумовлена ідентичністю умов надкритичного перетікання у випадках, що досліджувались. Для використання на практиці пропонованого способу до засобів вимірювання необхідно впровадити еталонну ємність з об'ємом, який визначено з високою точністю. Вимірювати об'єм слід у два етапи, застосовуючи для наповнення однаковий газ, найпростіший варіант – підготовлене повітря (очищене й осушене).

При цьому за результатами контрольних вимірювань при перетіканні з еталонної ємності спочатку потрібно уточнити значення коефіцієнта витрат, а потім при перетіканні з ємності, що вимірюється, – шуканау величину об'єму. Ґрунтуючись на тому, що у випадках, які розглянуті, мають використовуватись: однаковий газ, однакове сопло й однакові датчики

вимірювання тиску, можна очікувати точність визначення об'єму, близьку до розрахункової, з відхиленням у 0,1 %.

3.4 Визначення компонентного складу газів, які застосовуються під час досліджень генератора суміші

Відомо, що застосовувані як окиснювач та паливо для генерації суміші технічні гази мають у складі різні домішки [8, 3]. Саме тому перед проведенням експериментальних робіт потрібно обов'язково визначити фактичний склад газу, який застосовується для досліджень та провести відповідний перерахунок констант, використовуваних під час визначення параметрів генератора газової суміші.

За рекомендаціями роботи [70] для уникнення потреби в попередньому відкачуванні газу із ємностей необхідно здійснити завчасне циклічне продування їх газом, який використовуватиметься під час проведення подальших експериментів. Означене продування створює атмосферу в ємності, яка складається з цього газу. Як зазначено в роботі [70] для цього подається газ в ємність до певного тиску, після чого він випускається в атмосферу. Склад газу в ємності залежить від кількості циклів продувки. У табл. 3.2, як приклад, наведено вміст газу, який не міститься в складі повітря, після кожного циклу продувки попередньо наповненої повітрям ємності [52]. З наведених даних видно, що вже після п'ятикратного продування вміст цього компонента в ємності складає 99,97 %. Для зменшення непродуктивних витрат газового компонента рекомендовано, за технічної можливості, способом зазначеним у п. 2.1, зменшити об'єм продуваної ємності до мінімально можливого.

Циклічне продування може також застосовуватись під час визначення об'ємів газового тракту. Разом з тим додатково забезпечити однакову величину вологості газу у вимірюваному об'ємі та в еталонній посудині.

Таблиця 3.2 – Вміст газового компонента, який не міститься в складі повітря, після продування ємності

Цикл продувки компонентом з наповненням до тиску 0,5 МПа та випусканням його в атмосферу	Склад повітря в ємності, %			
	N ₂	O ₂	інші	компонент продувки
початковий	78,09	20,95	0,97	0
1-й	15,62	4,19	0,19	80,00
2-й	3,12	0,84	0,04	96,00
3-й	0,62	0,17	0,01	99,20
4-й	0,124	0,034	0	99,842
5-й	0,03	0	0	99,97

Продувка ємностей здійснюється почерговим відкриттям електромагнітних клапанів 6 і 10 для першої магістралі та 16 і 20, відповідно, для другої (рис. 3.8). Щоб забезпечити відбір проб, між клапанами 6 і 10 та 16 і 20 у газовий тракт додатково встановлюються вентилі 27 і 28 та 30 і 31 та ємності 29 і 32 для відбору газу, з'єднані трубками. Об'єми цих ємностей і заходи безпеки під час проведення відбору повинні відповідати вимогам стандарту ДСТУ ISO 10715:2009 [33]. Перебудову газових трактів забезпечують завдяки використанню швидкороз'ємних з'єднань.

Повторюючи зазначену процедуру, на кожному циклі продувки можливе забезпечення декількох вимірювань: при мінімум п'яти циклах продувки забезпечуватиметься достатня кількість даних для врахування випадкових похибок при визначенні об'ємів проміжних ємностей. По завершенні зазначеного циклу слід відібрати пробу з ємності. Це можна виконати завдяки стандартним методикам, що використовуються з метою встановлення складу компонентів газу, наприклад, як метод хроматографії [34, 89].

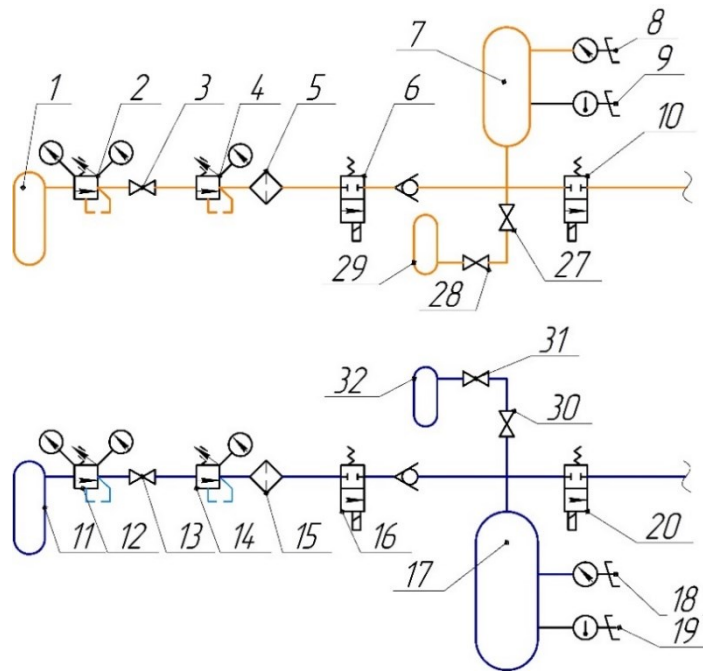


Рисунок 3.8 – Схема відбору проб із проміжних ємностей

Після інструментального визначення масових концентрацій складових c_i , $i = 1, \dots, N$ фактичні характеристики суміші газів можна розрахувати, використовуючи такі залежності:

– адіабата газової суміші:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{c_i(i_i + 2)}{M_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{c_i i_i}{M_i}}; \quad (3.12)$$

– газова стала суміші:

$$R_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^N \frac{c_i R}{M_i}; \quad (3.13)$$

– густина газової суміші:

$$\frac{1}{\rho} = \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{\rho_i}, \quad (3.14)$$

де i_i – кількість ступенів свободи молекули i -го газу (для двоатомних газів – N_2 , H_2 , O_2 – $i = 5$, для багатоатомних – CH_4 , C_3H_8 , CO_2 – $i = 6$); ρ_i , M_i – густина й молярна маса i -го газу.

3.5 Визначення частки газу, яка залишається в паразитних об'ємах

Об'ємну частку компонентів суміші, що залишається в порожнинах газового тракту можна визначити виходячи з її геометричної моделі, проте, враховуючи істотний вплив теплообміну зі стінками трубопроводів та припущення адіабатичності процесу при розрахунку маси компонентів суміші виникає похибка, яка має вагомий вплив на реальну точність дозування. Частка газу, що залишається в магістралі після наповнення робочої камери, є непостійною величиною і залежить від певних чинників, котрі виникають при перетіканні газу, через циклічну роботу устаткування. При збільшенні початкового тиску в проміжних посудинах збільшується миттєва масова витрата газу через отвори з критичними перерізами, що за заданої маси компонента в газовій суміші сприяє зменшенню тривалості наповнення, це наближає процес до адіабатичного. Згідно з цим збільшується температура газів у робочій камері і в трубопроводах. Складнішим для аналізування є наповнення робочої камери за циклічної роботи термоімпульсного устаткування. У цьому разі газ, який надходить до камери, у процесі теплообміну додатково нагрівається від розігрітих стінок робочої камери, це призводить до збільшення тиску паливної суміші. Проте температура газу, який перебуває в трубопроводах, додатково не підвищується, це призводить до того, що за однакової тривалості наповнення, у порівнянні з наповненням холодної робочої камери, маса газу в паразитних об'ємах газової магістралі збільшується. Отже, щоб побудувати алгоритми керування для забезпечення складу суміші високої точності та маси паливної суміші в камері, необхідне експериментальне визначення залежності маси газу, який залишився в газовому тракту, від параметрів перетікання. Через відсутність можливостей встановлення датчиків температури на робочу камеру, що не дає змоги визначати масу паливної суміші, застосовується імітатор камери. Як імітатор робочої камери використовують ємність із датчиками вимірювання тиску та

температури, аналогічну за конструкцією проміжним ємностям для компонентів суміші.

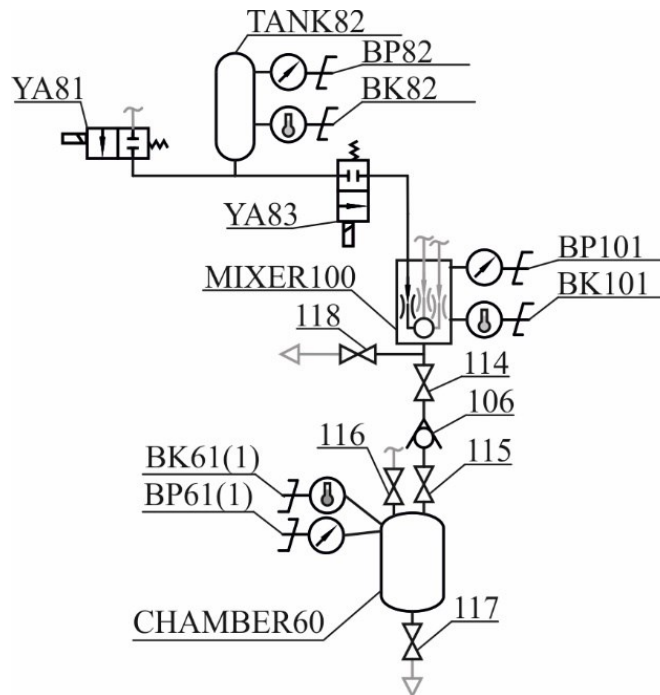


Рисунок 3.9 – Схема під'єднання імітатора робочої камери для дослідження процесів перетікання газів у камеру

Імітатор камери для проведення зазначених експериментів під'єднується до розробленого генератора газової суміші [41] згідно зі схемою, зображеною на рис. 3.9. Для цього використано блок наповнення робочої камери компонентом однієї газової суміші, що складається з проміжної ємності для газу TANK82, тракту подачі компонента у змішувач, змішувача MIXER100, магістралі подання газу до імітатора робочої камери й імітатора робочої камери CHAMBER60 з додатковими датчиками вимірювання тиску та температури, під'єднаними до системи ЧПК.

Методика визначення маси в паразитному об'ємі така:

а) для очищення резервуару від інших газів і забезпечення наявності тільки досліджуваного газу провести циклічну продувку газового тракту YA81 – 117 газом п'ять разів [94];

б) здійснити відбір проб газу з проміжної посудини TANK82 та за

описаною в підрозділі 3.4 методикою визначити його компоненти;

в) розрахувати характеристики газу за визначеними компонентами за формулами (3.12) – (3.14).

г) досягнувши виконання умов $P_{tank}^n / T_{tank}^n = const$ у проміжній ємності TANK82 наповнити імітатор робочої камери газом до тиску у робочому діапазоні (0,2...1,2 МПа);

д) виміряти тиск та температуру газу в проміжній ємності TANK82 та імітаторі робочої камери CHAMBER60 після виконання умов $P_{tank} / T_{tank} = const$ та $P_{cham} / T_{cham} = const$ відповідно. Виміряти значення тиску P_{mix} та температури T_{mix} у змішувачі MIXER100;

е) за отриманими значеннями тиску та температури в ємностях (TANK82, CHAMBER60) та визначеними параметрами газу розрахувати масу газу m_{tank} , що витікла з проміжної ємності TANK82 та масу газу m_{cham} , що натікла до імітатора робочої камери CHAMBER60. Визначити масу газу, яка залишилась у паразитних об'ємах газового тракту, за залежністю:

$$m_{mix}(P_{mix}, T_{mix}) = m_{tank} - m_{cham}. \quad (3.15)$$

Для перевірки методики проведено натурний експеримент наповнення імітатора камери за початковими умовами, що вказані в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Початкові умови експерименту

Газ	V_{tank}, M^3	P_{tank}, Pa	T_{tank}, K	V_{cham}, M^3	P_{cham}, Pa	T_{cham}, K
Азот	0,011186	771675,8	290,3	0,005942	105089	289,4

Поточна маса газу визначалася за виразом (3.16).

Як видно з графіків рис. 3.10 – рис. 3.12 сталі значення величини $P/T = const$ починається на 30 секунді, тобто продовження реєстрації показань впродовж 40 секунд з датчиків температури та тиску є достатнім для визначення маси газу (табл. 3.4).

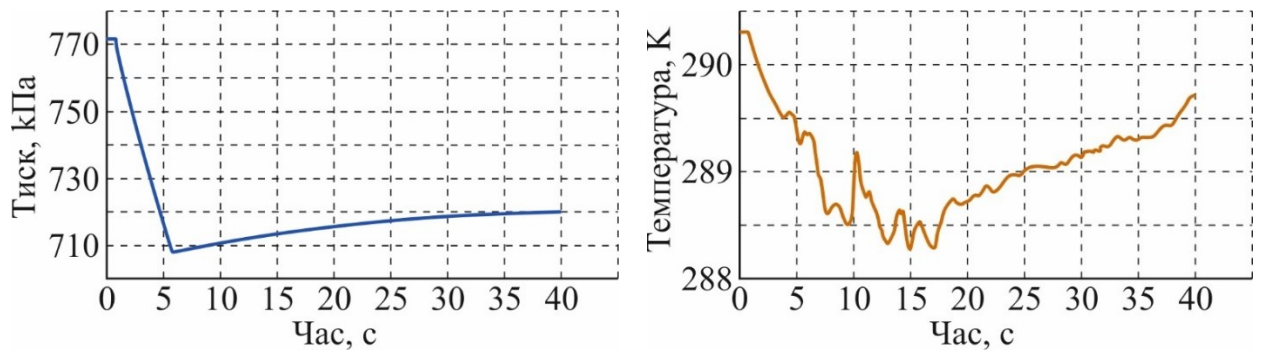


Рисунок 3.10 – Реєстрація показань тиску та температури в ресивері

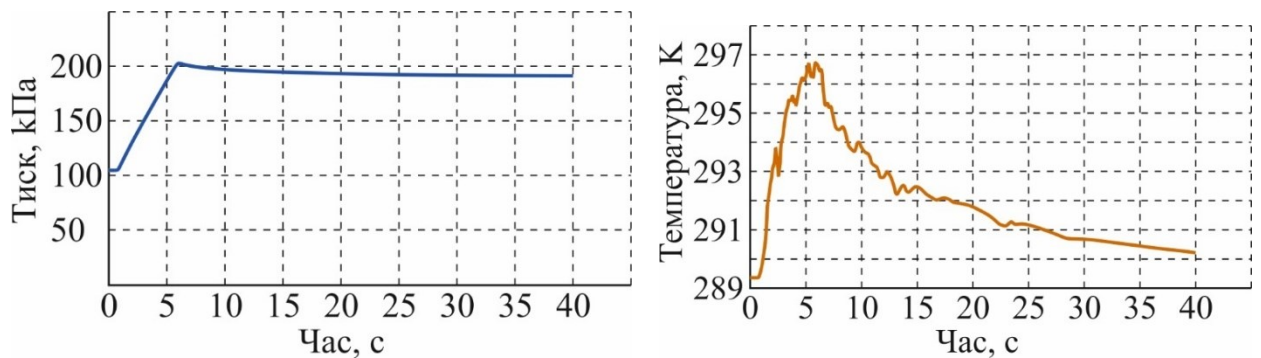


Рисунок 3.11 – Реєстрація показань тиску та температури в імітаторі камери

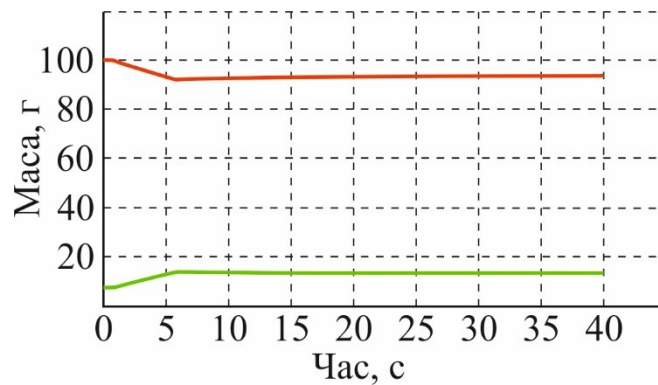


Рисунок 3.12 – Розраховані поточні маси газу в ємності та імітаторі камери

Таблиця 3.4 – Розраховані початкові та кінцеві маси газу

	Маса в проміжній ємності (m_{tank}), Г	Маса в імітаторі робочої камери (m_{cham}), Г
Початкова маса	100,187	7,212
Кінцева маса	93,682	13,163
Різниця	6,505	5,95

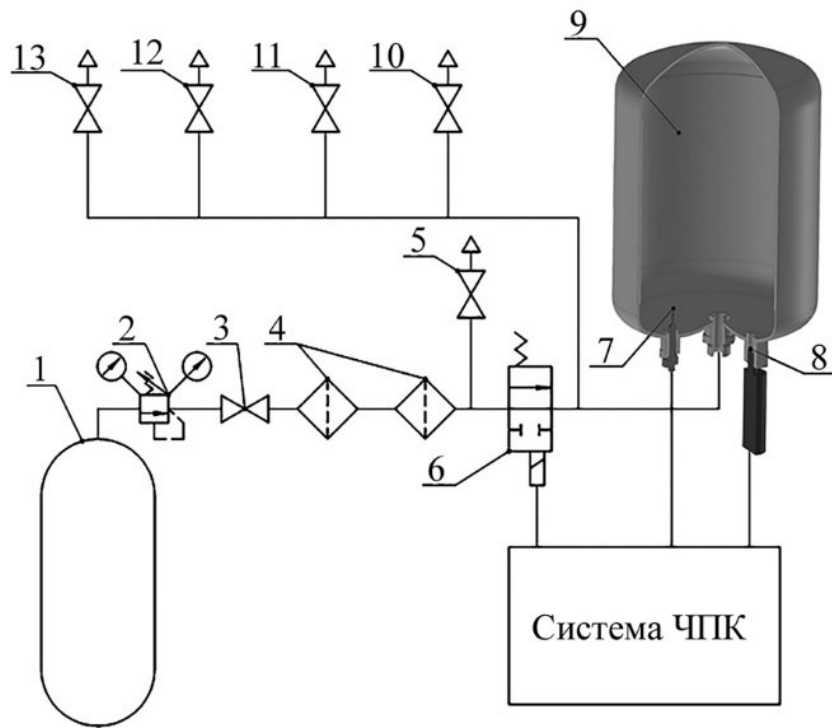
Визначивши масу газу, який витік із ємності TANK82 та який затік до імітатора камери CHAMBER60 розраховуємо масу газу, яка залишилась у паразитних (технологічних) об'ємах за формулою (3.15) $m_{\text{по}} = 0,554$ г. За розрахованим значенням маси газу $m_{\text{по}}$ та вимірними значеннями з датчиків тиску ВР100 та температури ВК100 отримуємо паразитний об'єм $V_{\text{по}} = 0,000176$ м³.

Для прогнозування залежності маси газу, що залишиться в магістралі, від параметрів натікання потрібна велика серія експериментів. За розрахунковими даними маси газу в паразитному об'ємі та температури і тиску у ділянці трубопроводу між змішувачем MIXER100 та клапаном YA83 побудувати залежність для газу $m_m(P_m, T_m, t)$ у межах робочого тиску устаткування. Отримані залежності після перевірки та встановлення їхньої точності заносяться до алгоритмів управління генерацією суміші та інтегрованого цифрового двійника.

3.6 Експериментальне дослідження наповнення проміжної ємності

Експериментальне дослідження проведено на блоці наповнення проміжної ємності компонента газової суміші, генератора паливної суміші термоімпульсного комплексу [41]. Для забезпечення безпечної роботи використано технічний азот. Схема експериментального блоку генератора суміші, до якого належать: вузол подачі компонента, магістраль подання газу до проміжної ємності із виконавчим електромагнітним клапаном, представлена на рис. 3.13.

Під'єднані до резервуара є два датчики – сенсор температури 7 (термопара) та сенсор тиску 8. Вони реєструють показники температури та тиску з частотою 1 КГц. Крім того, управління клапаном 6 здійснюється за допомогою системи ЧПК.



- 1 – балон під тиском; 2 – редуктор;
 3, 5, 10, 11, 12, 13 – крани; 4 – фільтри; 6 – електроклапан;
 7, 8 – датчики температури та тиску відповідно; 9 – проміжна ємність

Рисунок 3.13 – Схема експериментального блоку [58]

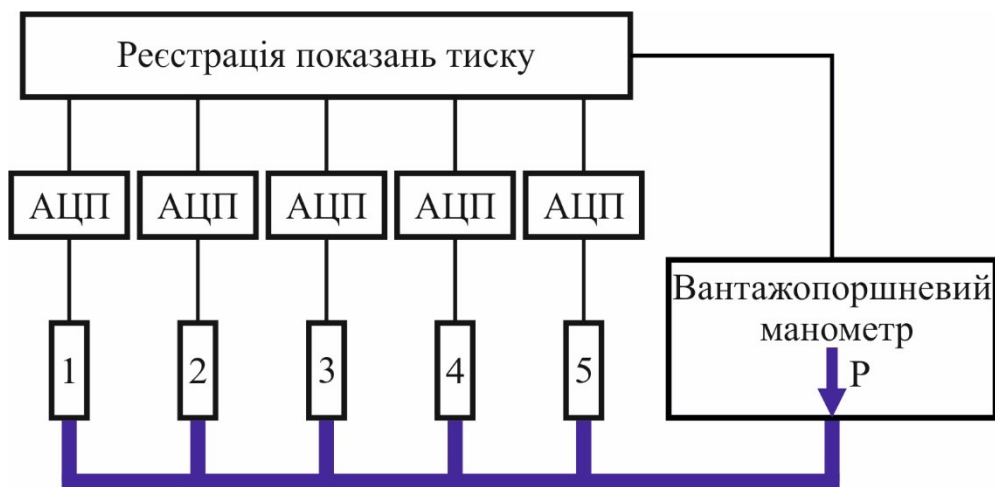
Задля підвищення точності вимірювання тиску необхідно провести їх градуювання, щоб визначити фактичне відхилення вимірюного тиску від встановленого.

Градуювання проведено на вантажопоршневому манометрі класу точності 0,05 за ДСТУ 4028-2001 «Манометри та калібратори надлишкового тиску поршневі» [5] за дотриманням таких умов:

- температура навколишнього повітря $26 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ за умови, що зміна температури за час повного циклу градуювання має бути не більшою за $1 \text{ }^\circ\text{C}$ (перетворювачі перед повіркою витримуються при даній температурі не менше 3 год);
- відносна вологість навколишнього повітря від 30 до 80 %;
- атмосферний тиск від 84 до 106 кПа (630...795 мм рт. ст.);

- витримка перетворювачів перед початком вимірювання після включення живлення – не менше 10 хв;
- датчики з'єднані з джерелом тиску металевою трубкою діаметром не більше 6 мм і довжиною не менше 150 мм;
- штуцер датчиків знаходиться в площині торця поршня вантажопоршневого манометра;
- динамічні порожнини градуйованих датчиків ретельно заповнені олією.

Перевірка приладів проводиться шляхом порівняння їх показань з дійсними значеннями тиску, які задаються на вантажопоршневому манометрі установкою вантажу на тарілку. Задля досягнення однаковості умов навантаження на всі застосовувані датчики тиску його слід здійснювати одночасно. Схема підключення датчиків тиску для тарування показано на рис 3.14.



1, 2, 3, 4, 5 – датчики тиску; АЦП – аналого-цифровий перетворювач

Рисунок 3.14 – Схема підключення датчиків тиску для тарування

Градування датчиків тиску проведено за трьома навантаженнями/розвантаженнями. Температура навколишнього повітря

22 °С, вологість 60 %, атмосферний тиск 99,593 кПа (749 мм рт. ст.). Градування здійснювалось від 100 кПа до 2100 кПа. Результати перевірки наведено на рисунках 3.15, 3.16, а отримані залежності внесені до системи ЧПК для коригування виміряних тисків.

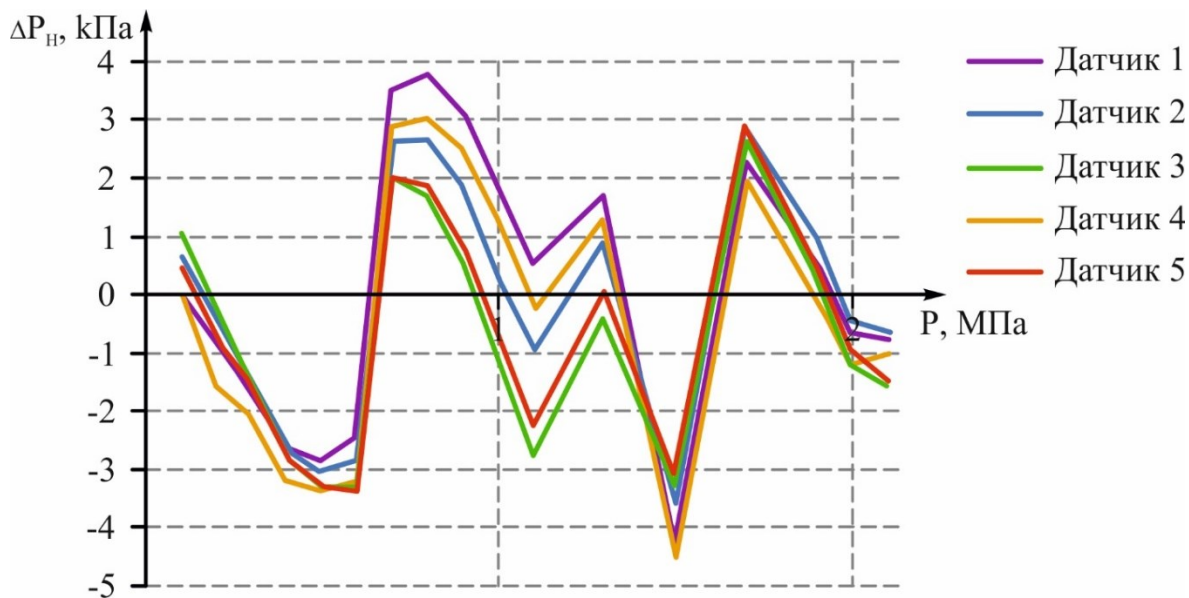


Рисунок 3.15 – Відхилення виміряного тиску від установленого

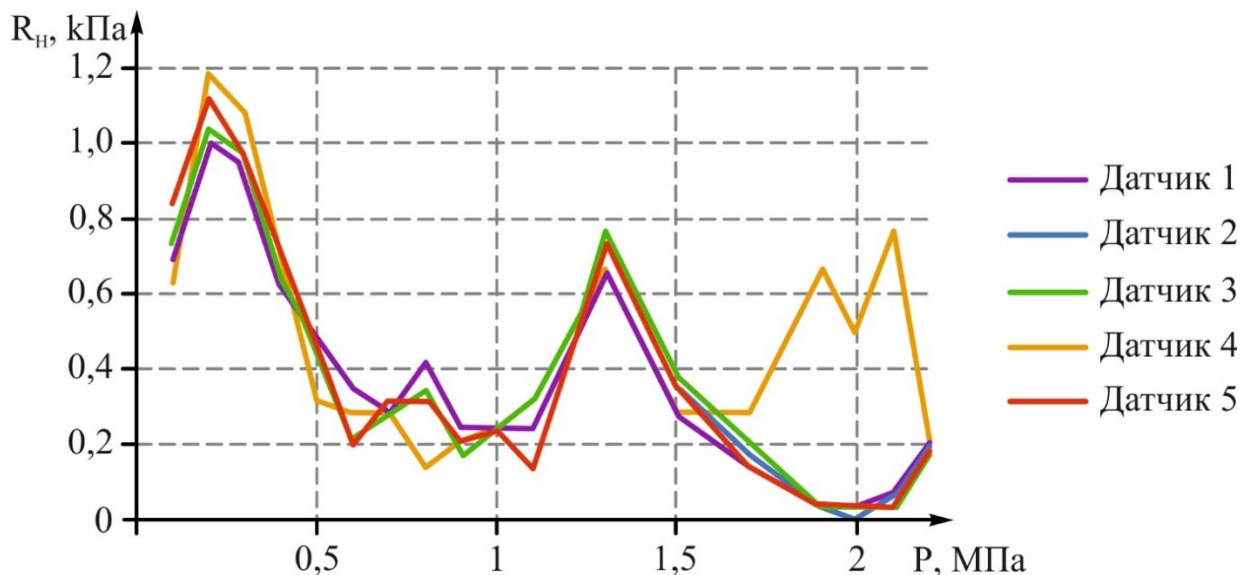


Рисунок 3.16 – Розкид виміряних значень тиску

Для очищення резервуару від інших газів і забезпечення наявності тільки досліджуваного газу, азоту, система перед проведенням експерименту була продувана п'ять разів [70].

Натурні експерименти проведені за початкових умов, які показано в табл. 2.1, за такою методикою:

- а) початок реєстрування даних з датчиків і сигналів управління в системі ЧПК;
- б) установлення тиску наповнення на редукторі 2;
- в) відкриття крана 3;
- г) установлення терміну наповнення проміжної ємності – відкриття через панель управління системи ЧПК клапана 6;
- д) наповнення проміжної ємності компонентом;
- е) зупинка наповнення проміжної ємності компонентом за зазначеним терміном – закриття за програмою ЧПК клапана 6;
- ж) закриття крана 3;
- з) продовження реєстрування даних протягом 40 секунд для вирівнювання температури газу в проміжній ємності.

Реєстрування експериментальних даних протягом 40 секунд по завершенні наповнення виконувалося для зменшення похибки розрахування остаточної маси та середньої витрати, що пояснюється значним відхиленням поточної від середньої температури в проміжній ємності.

Поточна маса газу розраховувалась за формулою:

$$m(t) = \frac{P(t)VM}{RT(t)} \quad (3.16)$$

де $P(t)$ – тиск поточний, Па;

$T(t)$ – температура поточна, К;

R – газова стала, Дж/(моль × К);

M – молярна маса газу, г/моль;

V – об'єм проміжної ємності, м³;

t – час, с.

На рис. 3.17 та рис. 3.18 представлені графіки зміни температури в проміжній ємності згідно з даними експериментів № 1 та 2 (табл. 2.1), відповідно, окрім цього на них показані результати моделювання за двома граничними умовами (стінки адіабатична та з постійною температурою).

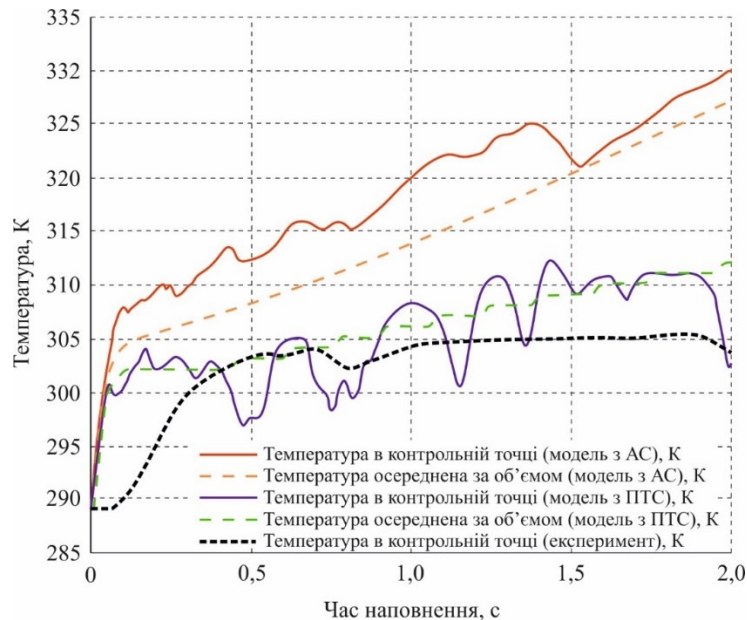


Рисунок 3.17 – Залежність температур газу в проміжній ємності при наповненні витратою $G=15,6$ г/с [58]

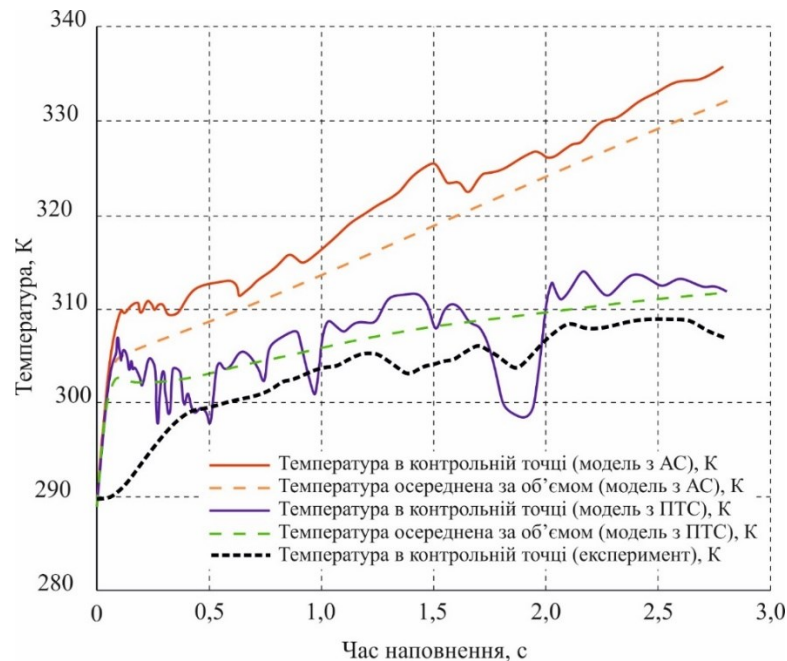


Рисунок 3.18 – Залежність температур газу в проміжній ємності при наповненні витратою $G=12,4$ г/с [58]

За умови сталої температури на стінці найближчі до експериментальних значення в точці контролю. У цьому разі відмінність результатів моделювання та експерименту сягає 4 % за витрати 15,6 г/с та 6 % за витрати 12,4 г/с.

На рис. 3.19 та рис. 3.20 представлено графіки зміни тиску в проміжній ємності за даними експериментів № 1 та 2 (табл. 2.1), відповідно, окрім цього на них показані результати моделювання за двома граничними умовами.

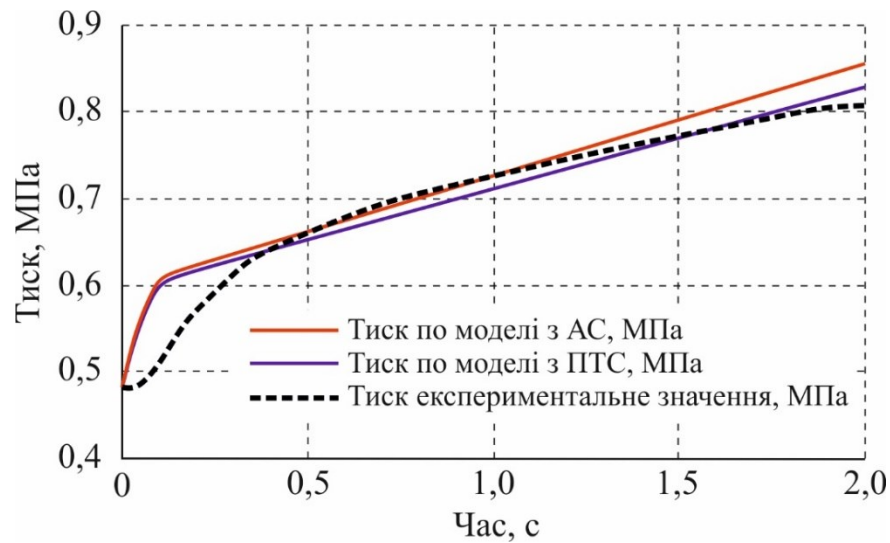


Рисунок 3.19 – Зміна тиску в проміжній ємності при наповненні витратою $G=15,6$ г/с [58]

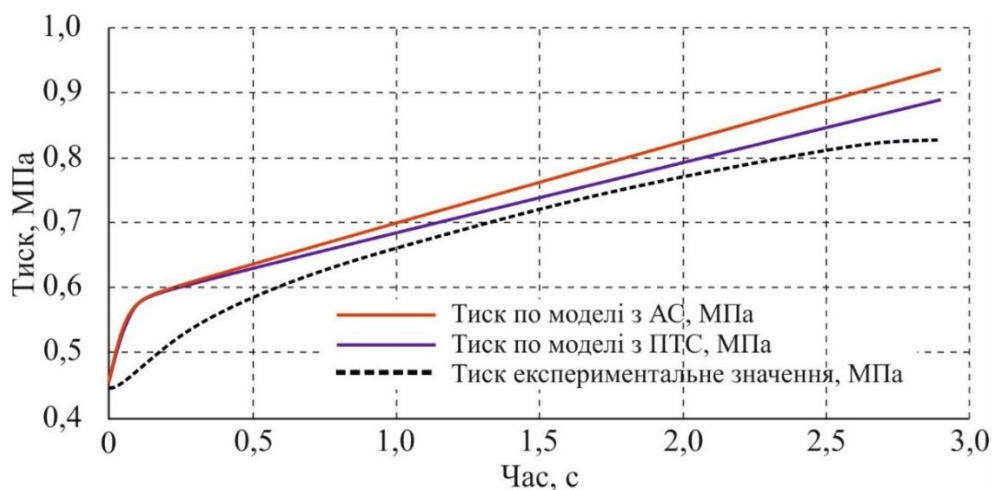


Рисунок 3.20 – Зміна тиску в проміжній ємності при наповненні витратою $G=12,4$ г/с [58]

Досить велика розбіжність розрахункових та експериментальних даних за тиском (12 %) може пояснюватися вищезазначеним припущенням щодо постійної витрати газу на вході.

Безумовно, маса газу, отримана за температурою в контрольній точці, розрахована в експерименті, матиме деяку похибку. Графіки зміни маси газу в проміжній ємності представлені: для витрати 15,6 г/с на рис. 3.21, для витрати 12,4 г/с на рис. 3.22. Незважаючи на вищезазначену розбіжність значень тиску та температури, неточність розрахування маси не більше 4 %.

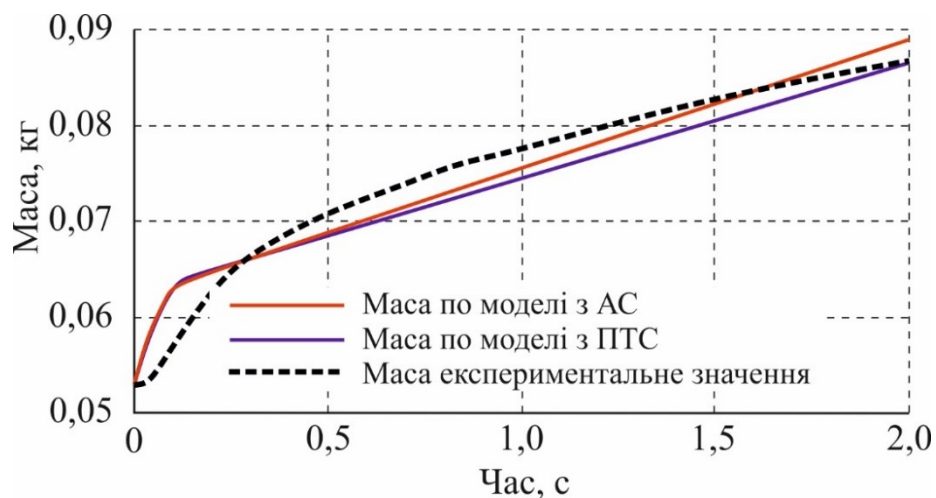


Рисунок 3.21 – Зміна маси в проміжній ємності при наповненні витратою $G=15,6$ г/с [58]

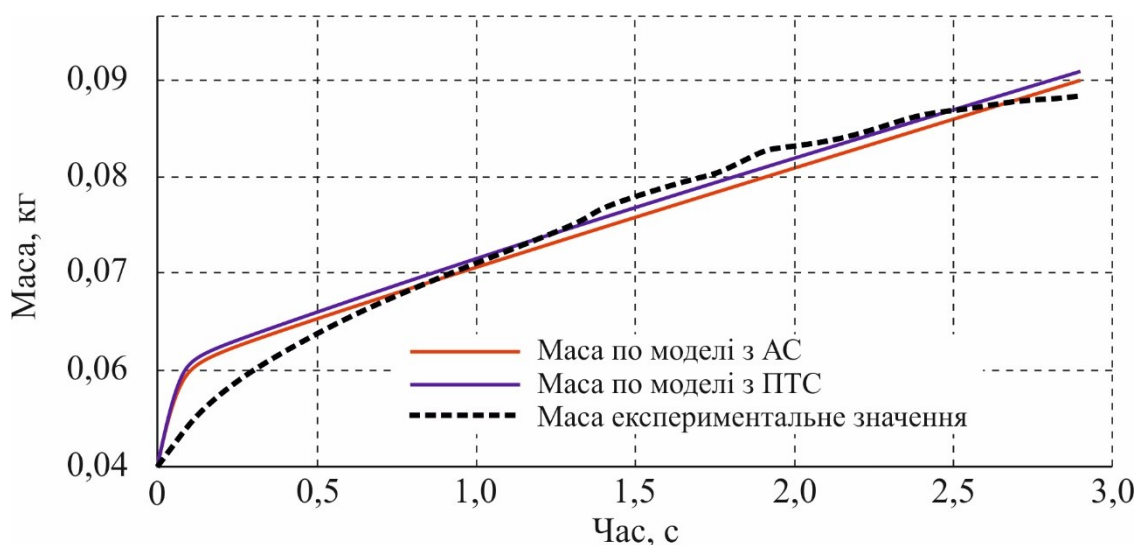


Рисунок 3.22 – Зміна маси в проміжній ємності при наповненні витратою $G=12,4$ г/с [58]

Зважаючи на те, що точність дозування компонентів газової суміші впливає на енергоозброєність термоімпульсного устаткування, найголовніший параметр – маса газу, яка контролюється в процесі дослідження. Отже, потрібно відкоригувати розрахункові моделі в початкових умовах, згідно з остаточним висновком щодо проведеного аналізу. Звичайно, найближчим до реальних умов має бути задавання витрат, згідно з витратною характеристикою редуктора, проте в разі її відсутності запропоноване коригування значень витрат, пропорційне отриманим різницям за масою. Відповідно, потрібно скоригувати значення середніх витрат (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Скориговані середні витрати в розрахункових моделях [58]

Скоригований параметр	№ експерименту	
	1	2
Середня витрата редуктора, г/с	13,62	11,29

На рис. 3.23 та рис. 3.24 представлено графіки зміни маси в проміжній ємності за змінених масових витрат, отримані після коригування розрахункових моделей.

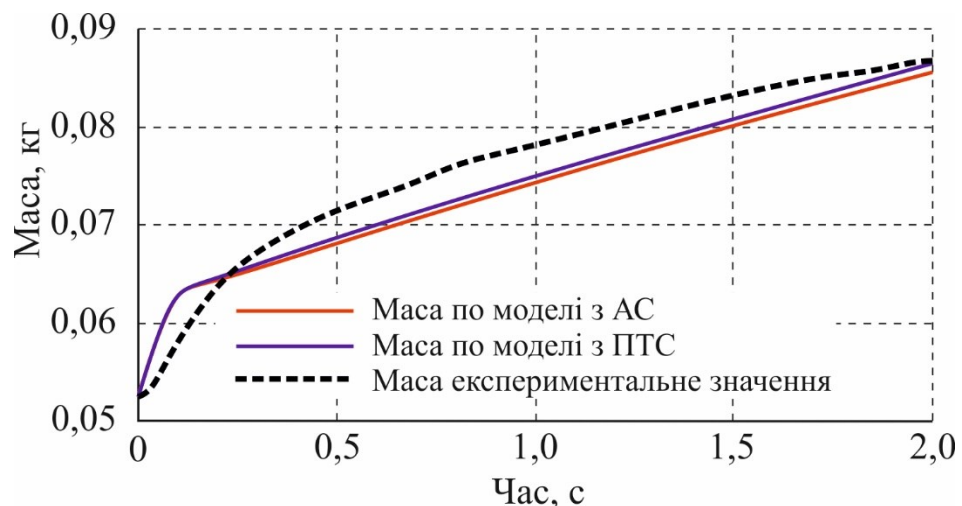


Рисунок 3.23 – Зміна маси в проміжній ємності при наповненні витратою $G=13,62$ г/с [58]

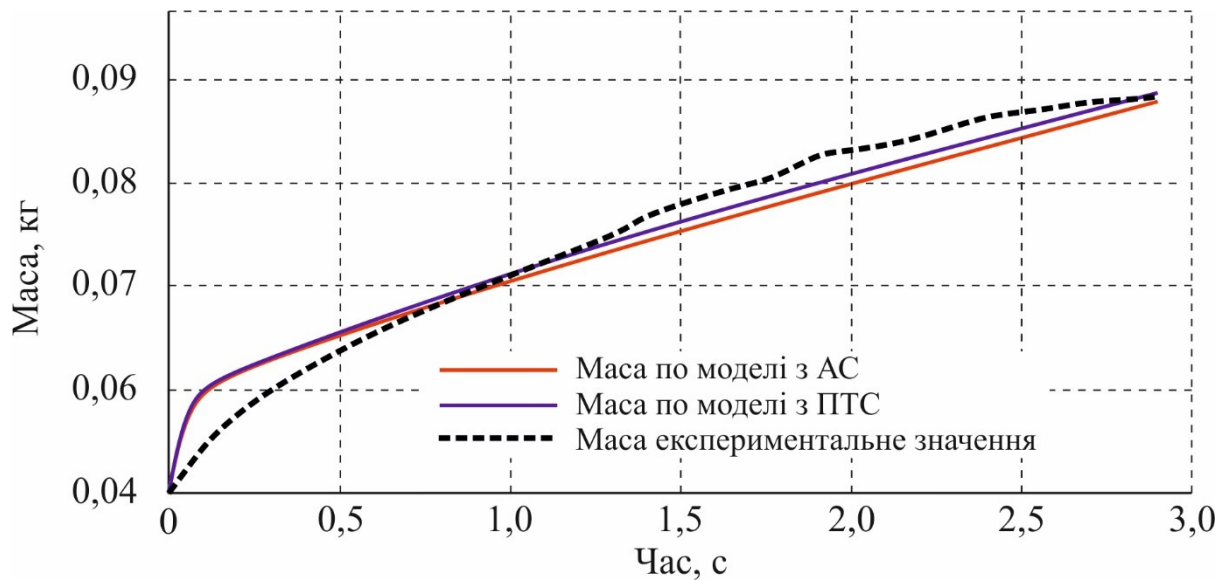


Рисунок 3.24 – Зміна маси в проміжній ємності при наповненні витратою $G=11,29$ г/с [58]

Зрештою, похибка результатів моделювання та експериментів щодо маси газу в проміжній ємності становить 0,5 %.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено методику визначення характеристик елементів розробленої системи генерації багатокomпонентних газових сумішей, яка дозволяє отримати параметри, необхідні для визначення закону управління виконавчими елементами для забезпечення заданої точності дозування компонент. А саме: компонентного складу, коефіцієнтів витрат сопел, площин поперечних перерізів сопел, частки газу в паразитних (технологічних) об'ємах, вимірювання об'ємів.

2. Уперше запропоновано метод швидкісного визначення об'єму посудини довільної форми, який передбачає заповнення вимірюваної посудини газом та його дренажу при надкритичному витіканні з сопла при вимірюванні тиску в посудині, в якому використовують сопло з попередньо визначеним коефіцієнтом витрати, а вимірювання тиску проводять багаторазово, що дозволяє визначити вимірюваний об'єм за час у діапазоні від

0,5 до 1 секунди. Під час імітаційного моделювання процесу вимірювання об'єму посудини складної форми точність визначення об'єму ємності становила 0,0625 % щодо даних САД моделі.

3. Запропоновано способи визначення об'єму посудини довільної форми які можуть бути застосовані для широкого кола задач, для яких допускається наповнення вимірюваних посудин газом з тиском, що забезпечує можливість реалізації надкритичного витікання в атмосферу. Зокрема, запропоновано спосіб вимірювання об'єму посудини через зміну її об'єму на відому величину, де заміри тиску та температури виконуються у момент коли співвідношення $P/T = const$ до початку зміни об'єму на відому величину та після її зміни.

4. Розбіжності в результатах моделювання та натурального експерименту не перевищують 12 % за температурою і тиском у точці контролю та 4 % за масою газу. Згідно з визначеним у процесах, що досліджуються, параметром точності складу газової суміші, насамперед маси компонента, за результатами порівняльного аналізу даних моделювання та натурних експериментів, числові моделі скориговані за значенням маси до збігу не більше 0,5 %.

Основні наукові результати, наведені в третьому розділі, опубліковано в роботах автора [62, 22, 23, 48, 49, 58].

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ПРЕЦИЗІЙНОГО ГЕНЕРАТОРА ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

Розроблений в даній роботі спосіб генерації газових сумішей може бути застосований в різних процесах фізико-технічної обробки, але в найбільшій мірі відповідає вимогам термоімпульсного оброблення детонуючими газовими сумішами. В першу чергу це забезпечується можливістю генерації суміші заданого складу зі швидкістю, яка відповідає умовам циклічної роботи термоімпульсного обладнання (5 – 10 секунд). Використання генератора, який реалізує запропонований спосіб утворення газових сумішей, передбачається у складі автоматизованих комплексів з числовим програмним керуванням. Це висуває до такого низку вимог, які необхідно врахувати при його проектуванні.

1. Виконавчі механізми генератора – клапани, за допомогою яких ведеться управління подачею газів, мають бути дистанційно керованими з можливістю управління від системи ЧПК обладнання. При цьому має бути забезпечена надійна та безпечна робота таких клапанів з урахуванням того, що у випадку термоімпульсного оброблення суміші, які генеруються з їх використанням, є вибухонебезпечними. Така вимога призводить до необхідності використання електромагнітних клапанів, які випускають серійно, для них можливо реалізувати роботу без викидання газів в оточуюче середовище.

2. При використанні зовнішнього змішувача в газовому тракті генератора ділянка між змішувачем та робочою камерою буде заповнена готовою паливною сумішшю. Це з одного боку є потенційно небезпечним фактором і потребує розробки заходів, які б розділяли зону згоряння та ділянку трубопроводу з паливною сумішшю. З іншого боку, при управління подачею суміші у робочу камеру за заданою масою заряду слід враховувати масу суміші, яка залишається у трубопроводі та не потрапляє в камеру.

3. Газовий генератор має бути оснащений цифровими датчиками для вимірювання температури та тиску газів у проміжних ємностях для управління подачею суміші за заданою масою та у газовому тракті після змішувача для додаткового контролю. Крім того, враховуючи те, що розроблюваний генератор планується використовувати у складі дослідницького стенду, мають бути передбачені додаткові засоби для безпосереднього дистанційного вимірювання витрати суміші. Враховуючи, що управління подачею газів передбачається за масою, для таких цілей найкращим вибором може бути коріолесовий витратомір, який безпосередньо вимірює масу газу, який через нього протікає.

Нарешті до конструкції складових елементів генератора мають висуватися додаткові вимоги з точки зору забезпечення вибухобезпечної роботи з сумішами підвищеного тиску. Це стосується як матеріалів, з яких мають виготовлятися трубопроводи, так і конструктивного виконання клапанів, фільтрів та трубопроводної арматури. Вказані вимоги було реалізовано при розробці прецизійного генератора газової суміші для задач термоімпульсного оброблення.

4.1 Опис розробленої схеми генератора газової суміші

Розроблений генератор газової суміші складається з блоку фільтрів, проміжних ємностей, блоку змішувача, блоку камери [24, 37]. Схему системи генерації газової суміші наведено на рис. 4.1 [71], де подача газів до генератора паливної суміші (наприклад: газ 1 – кисень, газ 2 – метан, газ 3 – нейтральний газ) здійснюється з газових балонів під тиском 20, 30, 40 через редуктори 21, 31, 41, оснащені датчиками тиску ВР20, ВР30, ВР40, які розраховані на тиск до 24 МПа, для контролювання в балонах залишку газу, необхідного для здійснення повного циклу оброблення (наповнення газовою сумішшю робочої камери та, за необхідності, продувки нейтральним газом). На вході до генератора газових сумішей встановлені вентилі 25, 35, 45.

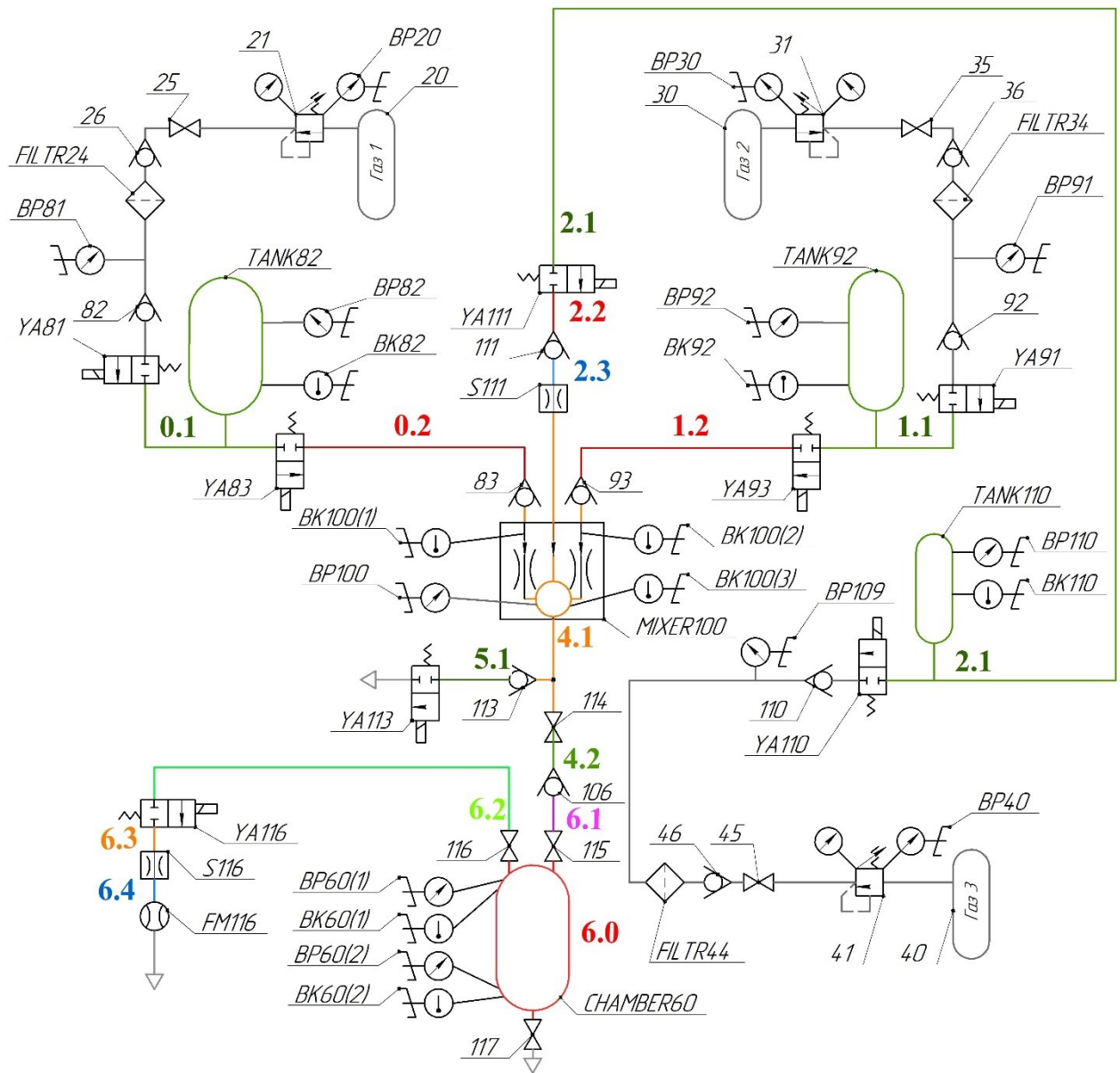


Рисунок 4.1 – Схема розробленого генератора газових сумішей

При моделюванні процесу наповнення виявилось, що після перетікання через отвір з критичним перерізом знижується температура газу, це може спричинити осад вологи та обмерзання, через що до якості газу, який використовується, підвищена вимога щодо чистоти та сухості.

Блок фільтрів FILTR24, FILTR34, FILTR44 дозволяє видалити тверді домішки до 5 мкм. Установлені датчики тиску BP81, BP91, BK110 із цифровою шкалою для візуального та системою ЧПУ контролю тиску.

До блоку проміжних ємностей належать клапани YA81, YA91, YA110, для наповнення їх газами (наприклад, киснем TANK 82, метаном TANK92, нейтральним газом TANK110), датчики вимірювання тиску BP82, BP92, BP110, датчики вимірювання температури BK82, BK92, BK110. Для більш точнішого наповнення цих ємностей компонентами газової суміші рекомендовано використовувати пропорційні клапани з автоматичним регулюванням витрат за тиском у проміжних ємностях У конструкції проміжних ємностей передбачено можливість змінення об'єму, це дає змогу калібрувати та здійснювати перехід на інші гази з мінімальними втратами, оскільки продування виконується в істотно зменшеному об'ємі. Датчики вимірювання тиску та температури дають змогу розрахувати масу газу в проміжних ємностях за їхнього наповнення до заданого значення і після наповнення камери CHAMBER60, а за їхньою різницею можна отримати масу паливної суміші в камері.

Наповнення проміжної ємності кисню TANK82 виконується двоходовим електромагнітним клапаном YA81 (відкриттям та подальшим його закриттям після досягнення заданих умов), контролюючи за показаннями датчиків вимірювання тиску BP82 та температури BK82. Аналогічно й для інших газів.

Для подачі компонентів до проміжних ємностей доречно використовувати клапани з керованою швидкістю відкриття (YA81, YA91 на рис. 4.1). Це потрібно для того, щоб за рахунок різної швидкості відкривання та закривання клапанів забезпечити співвідношення площин, які розраховуються за формулою (2.8), при їх роботі в крайніх положеннях (на початку та в кінці), в яких і виникає критичне перетікання, а не в соплах.

Склад блоку змішувача: двоходові електромагнітні клапани YA83, YA93, YA111, YA113, змішувач MIXER100. Змішувач забезпечений додатковою можливістю встановлення датчиків вимірювання температури BK100(1), BK100(2), BK100(3) та тиску BP100. Наповнення робочої камери

термоімпульсного устаткування паливною сумішшю виконується відкриттям електромагнітних клапанів YA83, YA93 і подальшим їхнім закриттям за розрахованим часом або досягнувши певних умов, які можуть бути отримані за даними датчиків. Конструкція змішувача описана у підрозділі 2.1 складається з таких основних частин: корпус, кришка, корки для доступу до сопел, сопла камера змішування.

Для уникнення ймовірної аварійної ситуації, що пов'язана з перебуванням паливної суміші в камері змішувача та інших ділянках газового тракту до робочої камери, передбачено їх продування нейтральним газом (наприклад, азотом) перед початком оброблення. Продування здійснюється відкриванням клапана YA113, щоб скинути тиск у змішувачі, та відкриванням клапана YA111, щоб подати нейтральний газ, тиск якого має бути нижчим за тиск у робочій камері. Наповнення завершується закриванням клапанів. За необхідності забезпечення певної витрати нейтрального газу можливе встановлення каліброваного сопла в S111.

Для виконання дослідницьких задач камера CHAMBER60 може бути замінена ємністю з високоточним визначенням об'ємом (імітатор камери), яка додатково може оснащуватися датчиками вимірювання тиску BP60(1), BP60(2) та температури BP60(1), BP60(2), а також забезпечена можливістю під'єднання інших пристроїв, наприклад, через клапан YA116 коріюлісового витратоміра FM116, який може використовуватися для визначення коефіцієнта витрат сопла.

У запропонованій схемі системи створення газової суміші із застосуванням проміжних ємностей, яка разом з використанням запропонованого змішувача забезпечують стабільність відсоткового складу компонентів у суміші завдяки застосуванню сопел з отворами із критичним перерізом заданої площини (рис. 2.2). У розробленій схемі вдосконаленого устаткування, поза основними компонентами, таких, як кисень (газ 1) та метан (газ 2) можливе використання таких компонентів, як азот та повітря, які

можуть бути приєднані за схемою магістралі газ 3 (рис.4.1, 4.2). Основна функція підсистеми подання азоту (газ 3) – це продування змішувача після припинення наповнення сумішшю робочої камери для запобігання займанню паливної суміші, яка залишилась в газовому тракті установки. За аналогічною схемою подавання основних робочих компонентів азот надходить у змішувач, це дозволяє за необхідності здійснювати формування в робочій камері трикомпонентної суміші з підвищеним тиском і обмеженою масою та, відповідно, питомого теплового потоку. Окрім компонента азоту, для формування складу робочої суміші та початкового тиску в камері устаткування є можливість підключення до камери окремої магістралі для подання до неї стисненого повітря. Усі вищезрозглянуті підсистеми компонентів (метан, кисень, азот і повітря) приєднуються до робочої камери обладнання за уніфікованою схемою, в кожній підсистемі використовуються проміжні ємності та змінні сопла для регулювання витрат.

Загальний вид розробленого генератора газових сумішей представлено на рис. 4.2.

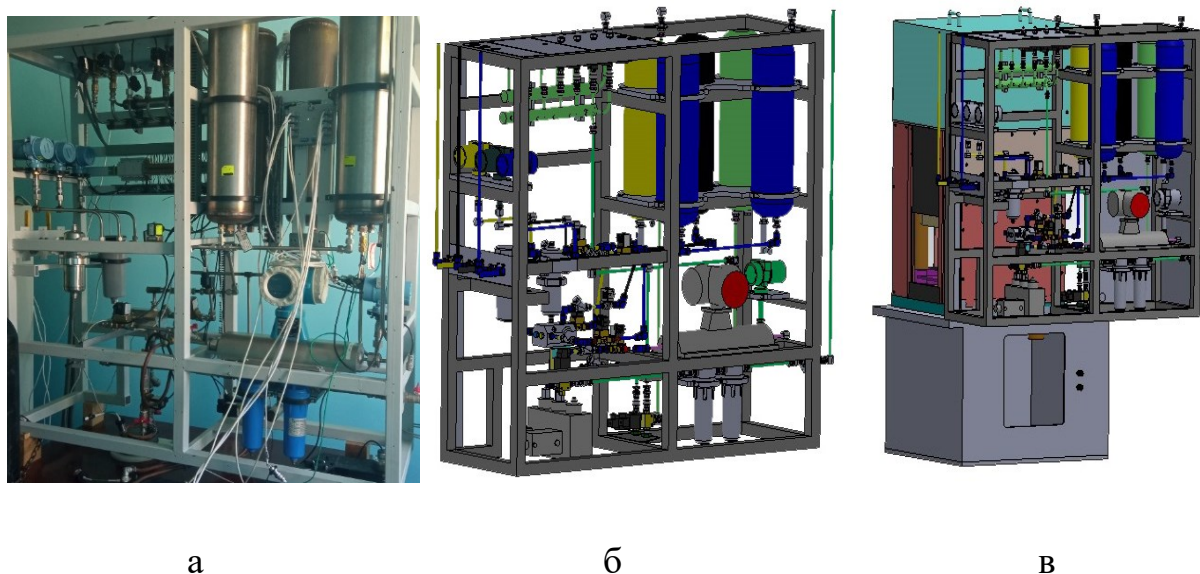


Рисунок 4.2 – Фотографія (а) та тривимірна модель генератора газових сумішей з інтегрованою пневматичною системою (б) та її монтаж на термоімпульсній установці (в)

4.2 Опис алгоритму роботи генератора газової суміші

Розрахований за формулою (2.13) час, маєтся на увазі час витікання газових компонентів з проміжних ємностей, який відрізняється від часу наповнення робочої камери в реальних умовах тому потрібно враховувати цю різницю перетікання компонентів суміші у газовому тракті, яка може виникати через час спрацьовування клапанів. Також наведена в роботі методика розрахування часу наповнення передбачає визначення співвідношення об'ємів проміжних ємностей відповідно до відсоткових пропорцій компонентів газової суміші, тобто, при необхідності змінення паливної суміші об'єм однієї з проміжних ємностей потребує коригування.

Моніторинг якості газової суміші за складом в системі ЧПК генератора має здійснюватися за масою компонентів, що увійшли до робочої камери, розраховані за рівнянням стану досконалого газу (закон Клапейрона – Менделєєва). Проте проблемою коректного розрахування маси в такому разі є визначення температури газів осередненої за об'ємом робочої камери, яка через повільне перемішування істотно відрізняється від вимірної температури в точці відповідним датчиком. Окрім цього, розташування будь яких датчиків вимірювання в робочій камері згорання термоімпульсного устаткування вважається неможливим через високі експлуатаційні температури та тиск. Тому є сенс встановлення датчиків вимірювання тиску та температури в місці стикування газового тракту з камерою згорання. Таким чином маса компонентів суміші в робочій камері може визначатися через різницю між масами компонента, який вийшов з проміжної ємності і залишився в газовому тракті.

Крім того, для керування генерацією газової суміші за наявними датчиками вимірювання тиску потрібно враховувати змінення тиску в робочій камері, яке виникає при наповненні через теплообмін газової суміші зі стінками, які нагріваються під час циклічної роботи устаткування.

При заповненні робочої камери при кожному циклі окрім компонентів паливної суміші у камері знаходиться атмосферне повітря та нейтральний газ, який залишився в змішувачі та паразитних об'ємах при продуванні після попереднього циклу наповнення. До маси заряду необхідно додати нейтральний газ та врахувати кількість кисню у складі повітря і зменшити на цю величину кількість кисню, який подається з проміжної ємності. Якщо технологічний цикл наповнення не передбачає кисню, а як окиснювач використовується повітря, тоді так само необхідно зменшувати його кількість відповідно до кількості повітря в робочій камері.

Таким чином підвищення точності дозування компонентів у запропонованій системі генерації газової суміші можливе через урахування похибок у кожному виконавчому механізмі. Для цього потрібно використовувати будь-який арбітражний метод щодо контролю маси компонент газОВОЇ суміші. Найбільш очевидним варіантом такого методу можна використати гравіметричний, котрий не залежить від температури й складу суміші. Також урахування систематичної похибки спрацьовування клапанів та інших виконавчих механізмів, може бути враховано програмним способом в автоматизованій системі керування.

Блок-схема генерації газової суміші для прецизійної термоімпульсного оброблення представлена на рис. 4.3 [1, 37]. Вихідні дані для генерації суміші є характеристики компонентів суміші, об'єми проміжних ємностей, паразитні об'єми та значення коефіцієнтів витрат отворів з критичним перерізом, які внесені до бази даних системи ЧПК. Ці дані можуть бути визначені за методиками, представленими в розділі 3.

За відомих значень початкового тиску в проміжних ємностях компонентів суміші здійснювати контроль витрат з високою точністю можна за часом наповнення.

Окрім зазначеного, щоб підвищити точність дозування теплового потоку за термоімпульсного оброблення при подачі компонентів, необхідно контролювати не тільки витрати компонентів суміші, а і її тиск у робочій камері.

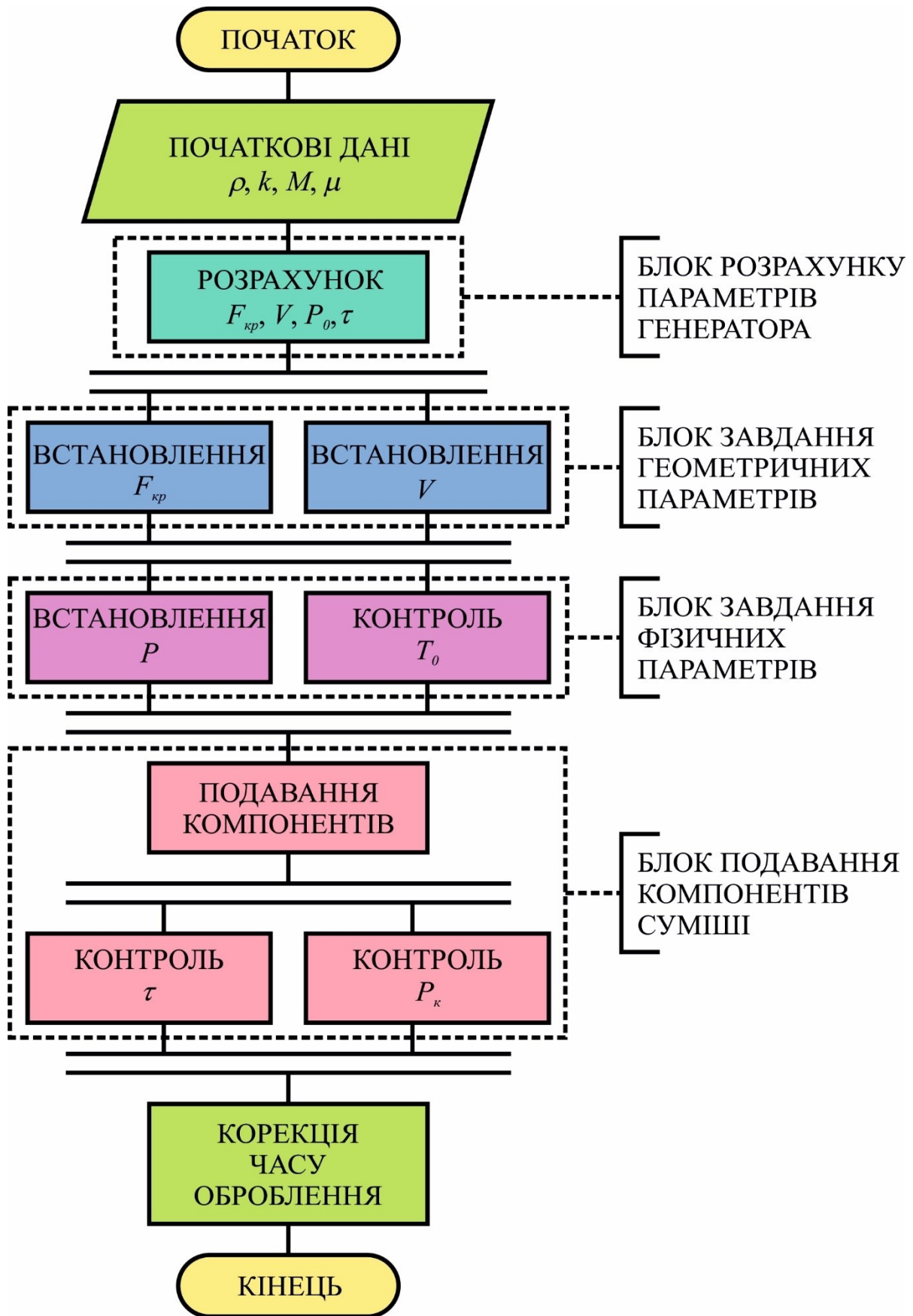


Рисунок 4.3 – Блок-схема керування генерацією палиної суміші для прецизійної термоімпульсної обробки

Як зазначалося вище, навіть не враховуючи теплообмін стінок з сумішшю, температура в камері за наповнення може суттєво змінюватися. Контролювати тиск у робочій камері необхідно, щоб визначити початкову температуру паливної суміші для розрахування маси заряду за залежністю (2.16).

На рис. 4.4 представлено блок-схему [37] алгоритму розрахунку параметрів генератора газової суміші із застосуванням описаних вище методик. Під час розрахунків контролюється виконання умов перепаду тиску, що забезпечують критичне перетікання через сопла, упродовж усього періоду генерації паливної суміші за залежністю (2.15). Слід унеможливити перевищення допустимого тиску в проміжних ємностях, заданих відповідно до технічних умов експлуатації устаткування.

Налаштування, які визначено за розрахунків параметрів генератора суміші, далі застосовуються в блоках «завдання геометричних параметрів» (F_i, V_i), «завдання фізичних параметрів» (P_{oi}) та «подачі компонентів» (F_i, τ).

Згідно із запропонованим способом динамічного сумішоутворення керування дозуванням і підготовкою паливної суміші виконується за такої послідовності [37].

Сталі дані розрахунків.

1. Об'єм камери $V_k, \text{ м}^3$, (задається під час програмування системи керування, а її об'єм визначений за однією з удосконалених методик з п. 3.3).

2. Паразитні об'єми (ділянка газових трактів між клапанами, які відкривають проміжні ємності, і робочою камерою $V_o^n, V_n^n, \text{ м}^3$, отримується експериментально і задається під час програмування системи керування).

3. Характеристики компонентів паливної суміші (задаються під час програмування системи керування).

Властивості компонентів паливної суміші, які зазвичай використовуються за термоімпульсного оброблення представлені в табл. 4.1 та їх стехіометричне масове співвідношення в табл. 4.2

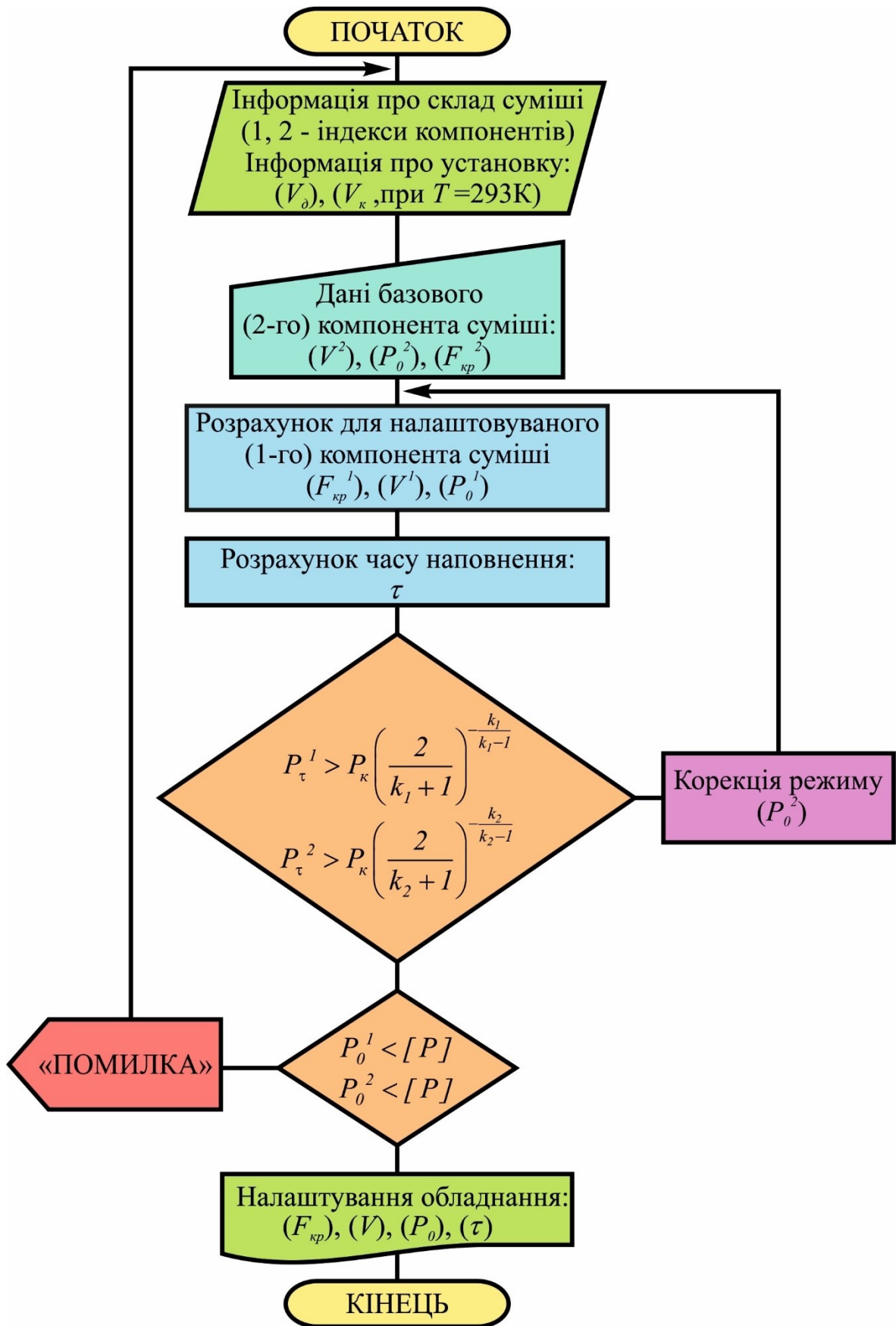


Рисунок 4.4 – Блок-схема алгоритму розрахунків параметрів генератора суміші

Таблиця 4.1 – Властивості компонентів паливної суміші за температури $T = 293,15 \text{ K}$ і початкового тиску $P = 101,325 \text{ кПа}$

Властивості компонентів паливної суміші	Пропан, C_3H_8	Метан, CH_4	Водень, H_2	Кисень, O_2	Повітря
$R, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	184,920	518,370	4123,809	259,800	287,060
k	1,138	1,320	1,410	1,400	1,400
$\rho, \text{ кг}/\text{м}^3$	1,8720	0,7168	0.0898	1,4700	1,2041
$M, \text{ кг}/\text{Моль}$	$44,097 \times 10^{-3}$	$16,040 \times 10^{-3}$	$2,016 \times 10^{-3}$	$32,000 \times 10^{-3}$	$28,980 \times 10^{-3}$

Таблиця 4.2 – Стехіометричне масове співвідношення паливо/окислювач (β) паливних сумішей, які застосовуються під час термоімпульсної обробки

Окислювач	Паливо		
	Пропан, C_3H_8	Метан, CH_4	Водень, H_2
Кисень, O_2	3,636	4,00	7,937
Повітря	15,672	17,24	34,20

4. Коефіцієнти витрат сопел палива та окислювача – μ_n, μ_o (задаються під час програмування системи керування, а їх значення отримуються експериментально за методикою з підрозділу 3.1 для усіх сопел).

5. Площини критичних перерізів отворів сопел окислювача f_o і палива f_n (задаються під час програмування системи керування, а їх значення отримуються експериментально за методикою з підрозділу 3.2).

Співвідношення площин критичних перерізів отворів в соплах окислювача F_o та палива F_n заздалегіть розраховуються за формулою:

$$F_o = \alpha\beta \cdot F_n \frac{\mu_n \sqrt{M_n} \psi_n}{\mu_o \sqrt{M_o} \psi_o}, \quad (4.1)$$

де α – коефіцієнт, що вказує на кількість окислювача, який перебуває в надлишку порівняно з паливом, зазвичай у термоімпульсній обробці дорівнює $1 \dots 1,1$).

Площини отворів у соплі обираються ґрунтуючись на тому, щоб діаметр сопел був простим з урахуванням можливостей виготовлення (наприклад, 1 мм, 1,25 мм, 1,5 мм, 1,75 мм, 2 мм). Остаточню, під час програмування системи керування, використовуються отримані співвідношення площин отворів сопел та їх значення F_o^* , F_n^* , розраховані за вимірними діаметрами виготовлених сопел.

б. Об'єми проміжних ємностей палива та окислювача V_n^n , V_o^n (m^3), (задаються під час програмування системи керування та налаштовуються за обраним типом палива).

Об'єм проміжної ємності палива обирається як сума об'єму робочої камери з віднятим об'ємом деталі з пристосуванням та паразитного об'єму. Співвідношення об'ємів проміжних ємностей окислювача V_o та палива V_n розраховуються за формулою:

$$V_o = \alpha\beta \cdot V_n \frac{\mu_n M_n k_o - I}{\mu_o M_o k_n - I}. \quad (4.2)$$

Дані для налаштування розрахунків у системі керування.

1. Характеристики паливних сумішей.

Тип палива (задається оператором в інтерфейсі програми):

- пропан;
- метан;
- водень.

Тип окислювача (задається оператором в інтерфейсі програми):

- повітря;
- кисень.

Тиск паливної суміші $P_{0\text{сум}}$ (МПа) при $T = 293,15$ (К) (задається оператором в інтерфейсі програми).

2. Об'єм деталей що оброблюються, разом з пристосуванням для їх закріплення в робочій камері V_d (m^3), (може бути визначено та передано з CAD моделі, задається оператором в інтерфейсі програми).

3. Тривалість оброблення $t_{обр}$ (с) (задається оператором в інтерфейсі програми).

Визначення початкових характеристик газових компонентів у проміжних ємностях.

1. За первинного наповнення ємностей.

Під час первинного наповнення проміжних ємностей варто враховувати, що всередині них знаходиться повітря за атмосферного тиску. Наповнення проміжних ємностей слід проводити, виконавши процедуру випускання повітря з них. З цією метою відкриваються електромагнітні клапани, які з'єднують ємності з магістраллю для скидання газу до атмосфери. Переміщенням поршня в крайнє положення (засіб зміни об'єму ємності) встановлюється мінімальний об'єм проміжної ємності, проводиться витіснення повітря з них. По завершенні випускання повітря з цих ємностей, коли їх об'єми є мінімальними, виконується 5-ти кратне наповнення проміжних ємностей відповідним газом до тиску 0,5 МПа з подальшим випусканням газів із них до атмосфери. Під час випускання палива його необхідно розбавляти азотом до безпечного рівня концентрації (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Об'ємний відсоток палива в газовій суміші, який є вибухобезпечним

Пропан	Метан	Водень
2,2	5,0	4,0

По завершенні продування проміжних ємностей до них подаються відповідні газові компоненти (наприклад, кисень і метан), водночас переміщуються регулюючі поршні до положення, за яким забезпечуються раніше розраховані об'єми цих ємностей.

2. При змінні типу палива й окислювача.

За необхідності зміни компонента суміші виконується послідовний випуск газу, який був у відповідній проміжній ємності. З цією метою відкриваються електромагнітні клапани, які з'єднують ємність з магістраллю для скидання газу до атмосфери. Переміщенням поршня в крайнє положення (засіб зміни об'єму ємності) встановлюється мінімальний об'єм проміжної ємності, проводиться витіснення газу з них. По завершенні випускання газу з ємності, коли її об'єм є мінімальним, виконується 5-ти кратне наповнення проміжних ємностей відповідним компонентом до тиску 0,5 МПа з подальшим випусканням його до атмосфери. Під час випускання паливо необхідно розбавляти азотом до безпечного рівня концентрації. По завершенні продування проміжної ємності до неї подається відповідний газовий компонент (наприклад, кисень або метан), водночас переміщуються регулюючі поршні до положення, за яким забезпечуються раніше розраховані об'єми цих ємностей.

3. Розрахування початкових мас газових компонентів у проміжних ємностях:

– маса окислювача:

$$m_0^o = V_o \frac{P_0^o}{R_o T_0^o}; \quad (4.3)$$

– маса палива:

$$m_0^n = V_n \frac{P_0^n}{R_n T_0^n}. \quad (4.4)$$

Розрахування параметрів наповнення паливною сумішшю робочої камери.

1. Розрахування характеристики паливної суміші за введеними даними.

Масова концентрація окислювача:

$$c_0 = \frac{\alpha\beta}{\alpha\beta + 1}; \quad (4.5)$$

Масова концентрація палива:

$$c_n = \frac{1}{\alpha\beta + 1}. \quad (4.6)$$

Густина паливної суміші:

$$\rho_{\text{сум}} = \frac{\rho_o \rho_n}{c_o \rho_n + c_n \rho_o}. \quad (4.7)$$

Газова стала паливної суміші:

$$R_{\text{сум}} = c_o R_o + c_n R_n. \quad (4.8)$$

Маса суміші в камері:

$$m_{\text{сум}} = \rho_{\text{сум}} (V_{\kappa} - V_{\delta}). \quad (4.9)$$

Маса окислювача в камері:

$$m_o = c_o m_{\text{сум}}. \quad (4.10)$$

Маса палива в камері:

$$m_n = c_n m_{\text{сум}}. \quad (4.11)$$

Маса окислювача, який витікатиме з відповідної ємності:

$$m_{on} = m_o + \eta m_o \frac{V_o^n}{V_{\kappa} - V_{\delta}}. \quad (4.12)$$

Маса палива, яке витікатиме з відповідної ємності:

$$m_{nn} = m_n + \eta m_n \frac{V_n^n}{V_{\kappa} - V_{\delta}}, \quad (4.13)$$

де η ($\eta > 1$) – коефіцієнт, за яким враховується збільшення густини газів у паразитних об'ємах у порівнянні із значеннями в робочій камері через перепад між ними тиску, що визначається за гідравлічним опором у магістралях та зусиллям спрацьовування зворотних клапанів.

2. Розрахунок тривалості наповнення робочої камери газовою сумішшю.

Попереднє визначення тиску в проміжній ємності палива:

$$P_{0n} = k_n \left(P_{0см} \cdot \left(\frac{2}{k_n + 1} \right)^{-k_n/(k_n-1)} + P_{0см} \cdot c_n \right). \quad (4.14)$$

Розрахунок тривалості витікання палива з проміжної ємності:

$$\tau_n = \frac{I}{B_n} \left(\left(\frac{A_n}{A_n - C_n} \right)^{\frac{k_n-1}{2}} - I \right), \quad (4.15)$$

$$\text{де } A_n = \mu_n F_n \psi_n P_{0n} (k_n - 1); B_n = \frac{(k_n - 1) F_n \sqrt{R_n T_{0n}}}{2V_n} \psi_n; C_n = 2m_{nn} B_n \sqrt{R_n T_{0n}}.$$

Тривалість витікання окислювача приймається рівною часу витікання палива.

3. *Попередній розрахунок початкового тиску в проміжній ємності окислювача:*

$$P_{0o} = P_{0n} \frac{\int_0^\tau (1 + B_n t)^{-\frac{k_n+1}{k_n-1}} dt}{\int_0^\tau (1 + B_o t)^{-\frac{k_o+1}{k_o-1}} dt} = \frac{B_o k_o (k_n - 1) (B_n \tau + 1)^{\frac{k_n+1}{k_n-1}} - 1}{B_n k_n (k_o - 1) (B_o \tau + 1)^{\frac{k_o+1}{k_o-1}} - 1}; \quad (4.16)$$

4. *Розрахування кінцевого тиску в робочій камері з урахуванням змінення температури:*

$$P_{\tau k} = P_{0o} \frac{V_o}{V_K - V_D + V_o^n} \left[1 - (1 + \tau \cdot B_o)^{\frac{-2k_o}{k_o-1}} \right] + \\ + P_{0n} \frac{V_n}{V_K - V_D + V_n^n} \left[1 - (1 + \tau \cdot B_n)^{\frac{-2k_n}{k_n-1}} \right] + P_{0k}, \quad (4.17)$$

де P_{0k} – початковий (атмосферний) тиск у камері.

5. *Розрахування кінцевого тиску в проміжних ємностях відповідних компонентів з урахуванням змінення температури.*

Розрахування кінцевого тиску в ємності окислювача:

$$P_{\tau o} = P_{0o} (1 + B_o \tau)^{\frac{-2k_o}{k_o-1}}. \quad (4.18)$$

Розрахування кінцевого тиску у ємності палива:

$$P_{\tau n} = P_{0n} (1 + B_n \tau)^{\frac{-2k_n}{k_n-1}}. \quad (4.19)$$

6. *Перевірка умов закритичного перепаду тиску під час наповнення робочої камери.*

Перевірка умов закритичного перепаду для проміжної ємності окислювача:

$$P_{\tau o} > P_{\tau k} \left(\frac{2}{k_o + 1} \right)^{\frac{k_o}{k_o - 1}}. \quad (4.20)$$

Перевірка умов закритичного перепаду для проміжної ємності палива:

$$P_{\tau n} > P_{\tau k} \left(\frac{2}{k_n + 1} \right)^{\frac{k_n}{k_n - 1}}. \quad (4.21)$$

За невиконання якої-небудь з цих умов необхідно пропорційно збільшити початковий тиск у проміжній ємності палива та перерахувати значення за формулами (4.15) – (4.21). По виконанні умов за залежностями (4.20) і (4.21) потрібно остаточно визначити початковий тиск у проміжних ємностях палива й окислювача.

Розраховані початкові значення маси та тиску компонентів суміші в проміжних ємностях потрібно моніторити на всіх стадіях роботи системи генерації паливної суміші. При цьому через встановлені в проміжних ємностях датчики вимірювання тиску та температури проводиться розрахування реальних мас компонентів у відповідних проміжних ємностях та вираховується момент подання сигналу для припинення подачі компонентів у проміжні ємності або камеру із залученням даних часу спрацьовування відповідних електромагнітних клапанів.

Для урахування температури газової суміші в робочій камері можна визначити її за допомогою додаткового вимірювання тиску даної суміші під час наповнення. За допомогою отриманих даних початкову температуру суміші можна визначити виходячи з рівняння стану досконалого газу:

$$T = \frac{P_{\text{сум}}}{\rho_{\text{сум}} R_{\text{сум}}} \quad (4.22)$$

де $P_{\text{сум}}$ – вимірне значення тиску після закінчення наповнення; $\rho_{\text{сум}}$ – густина суміші; $R_{\text{сум}}$ – газова постійна суміші, яка може бути визначена за залежністю (3.13).

4.3 Структура й організація роботи програмно-апаратного комплексу

4.3.1 Вибір підходів для розробки системи управління генератором газової суміші

Розроблення системи керування генератором газової суміші з подальшою інтеграцією, наприклад, до автоматизованого комплексу прецизійного термоімпульсного оброблення є достатньо специфічним завданням. При цьому деякі стандартні підходи можуть бути реалізовані при створюванні систем числового програмного керування, враховуючи особливості зазначеного процесу.

Наприклад, завдання із дозування паливної суміші може бути вирішена за допомогою алгоритмів, які застосовуються при позиційному управлінні органами верстатів для різання металів. Зазначені алгоритми здійснюють переміщення робочих органів на відповідно визначену відстань з великою точністю, при цьому для зворотного зв'язку використовуються датчики положення. Аналогічно, розглядаючи задачу дозування паливної суміші, використання подібних алгоритмів та датчиків вимірювання тиску і температури дасть змогу виконати дозування суміші з високою точністю. Принцип керування допоміжними органами устаткування аналогічний до таких, які використовуються у верстатах для різання металів. Таким чином, система автоматизованого керування генерації газової суміші може бути створена засновуючись на стандартній системі ЧПК.

Поміж основних варіантів архітектури сучасних систем ЧПК, які представлені на ринку, мають перевагу системи на базі персонального комп'ютера, які надають зручний та гнучкий інтерфейс для оператора з використанням комунікаційних можливостей через підключення до локальних і глобальних мереж і надають високої точності (прецизійності) керуванню технологічними процесами і водночас, окрім зазначеного, високої надійності та безперебійного функціонування системи ЧПК.

Найважливішими вимогами до системи керування генератором газової суміші є:

- забезпечення точності та стабільності співвідношення компонентів у газовій суміші;
- забезпечення заданої точності величини маси газової суміші, яка подається до робочої камери;
- забезпечення точності часу наповнення;

Підхід при розробці системи ЧПК для генератора газової суміші, у якому процес наповнення проміжних ємностей та робочої камери за допомогою керування станом у проміжних ємностях за вимірними значеннями датчиками тиску, температури та положення поршня, що регулює об'єм, визначається кількістю відповідного газового компонента (масою). Для подачі відповідного компонента до проміжної ємності виконується керування впускним електромагнітним клапаном. А для подавання суміші до робочої камери – випускними електромагнітними клапанами компонентів. Тобто керування процесом генерації газової суміші з подачею до робочої камери забезпечується чотирма пристроями за станом у проміжних ємностях.

Фактичний об'єм проміжної ємності визначається за положенням поршня за аналогічною схемою визначення положення виконавчих органів верстатів обробки різанням з використанням енкодерів показання яких відкалібровані експериментальним методом відносно вимірюного об'єму, який може бути отриманий способами наведеними у 3-му розділі цієї роботи.

Організація керування за параметром маси та розраховане співвідношення площин перерізів критичних отворів дозволяє отримати необхідну точність складу газової суміші та її маси у робочій камері, що реалізується системою ЧПК за чотирикоординатною схемою керування масами газових компонентів у відповідних проміжних ємностях.

Задля забезпечення можливості виконання досліджень на реальному (експериментальному) генераторі газових сумішей необхідно розробити програмно-апаратний комплекс та інтегрувати його до системи ЧПК.

Програмно-апаратний комплекс дослідження алгоритмів та процесів пропонується вводити як додаткове апаратне і програмне забезпечення у дворівневу систему ЧПК на базі персональних комп'ютерів.

На прикладному рівні дворівнева система ЧПК виконує такі завдання керування [9, 35, 53]:

- геометричні – управління приводами, які стежать за положенням виконавчих органів;
- логічні – організація керування електроавтоматикою;
- диспетчерські – забезпечення керування іншими задачами на прикладному рівні;
- технологічні – підтримування чи оптимізація технологічних параметрів процесу;
- комунікаційні – забезпечення обміну інформацією з системою управління підприємством;
- термінальні – підтримування діалогу з оператором, коригування та верифікація програм, які керують процесом, відображення станів системи.

Засоби програмно-апаратного комплексу мають забезпечувати отримання та збереження інформації щодо виконання алгоритмів та усіх вищеперелічених завдань.

Технічні рішення для організації архітектури системи ЧПК і системи досліджування алгоритмів та процесів повинні забезпечувати високу частоту циклу управління обладнанням. Таким чином, для забезпечення контролювання тиску та температури в проміжних ємностях, як координати керування необхідно використовувати системи ЧПК з високою частотою циклу керування. Сучасні системи ЧПК здійснюють керування технологічним устаткуванням з частотою циклу управління від 300 до 2500 Гц [56]. Для забезпечення необхідної точності керування процесом генерації паливної суміші достатньо використовувати системи ЧПК з частотою циклу 1000 Гц,

При побудові програмно-апаратного комплексу та системи ЧПК на базі персонального комп'ютера необхідно враховувати особливості реалізації

режиму керування за реальним часом. Поняття реального часу розуміється, як передбачувана обчислювальна система, а тривалість часу, який витрачається на виконання певної процедури, не перевищує обмеження, що встановлене заздалегідь. Це означає таке: для виконання однакових операцій обчислювальною системою може витрачатися час, а його тривалість залежить від різноманітних обставин та не виходить за визначені межі. Програмно-апаратний комплекс для досліджування алгоритмів та процесів надає можливість вимірювати реальну тривалість процесів, які відбуваються в системі ЧПК та устаткуванні. Внутрішній таймер у персональному комп'ютері не дає змогу отримати потрібну точність вимірювання фактичної тривалості процесів. Отже, у системі ЧПК необхідно передбачити спеціальний апаратний таймер для вимірювання часу виконання певних етапів алгоритмів та всього циклу керування та для забезпечення синхронізації внутрішнього циклу системи ЧПК із зовнішніми вимірювальними пристроями.

Для реалізації можливості аналізу технологічного процесу та інших подій, які відбуваються в генераторі, потрібно реєструвати різноманітні сигнали та дані незалежною апаратурою, яка паралельно з процесом керування обладнанням здійснює запис даних. Після закінчення повного технологічного циклу можна використовувати даний запис для аналізу й обробки результатів у будь-якій спеціалізованій програмі.

Отже, вищерозглянуті вимоги дозволяють розробити програмно-апаратний комплекс з управлінням у режимі реального часу та зі збиранням і реєстрацією об'єктивних даних щодо станів та процесів, які реалізуються в генераторі, повнота яких забезпечує можливість дослідження заданих алгоритмів і технологічних процесів.

4.3.2 Вибір підходу для розробки апаратної частини комплексу

Для дослідження процесів та алгоритмів розроблено схему структури апаратного забезпечення системи ЧПК, апаратна частина комплексу якого

базується на дворівневій системі ЧПК, де завдання керування розподілено на два персональні комп'ютери, які об'єднані в локальну мережу (рис. 4.5) [35].

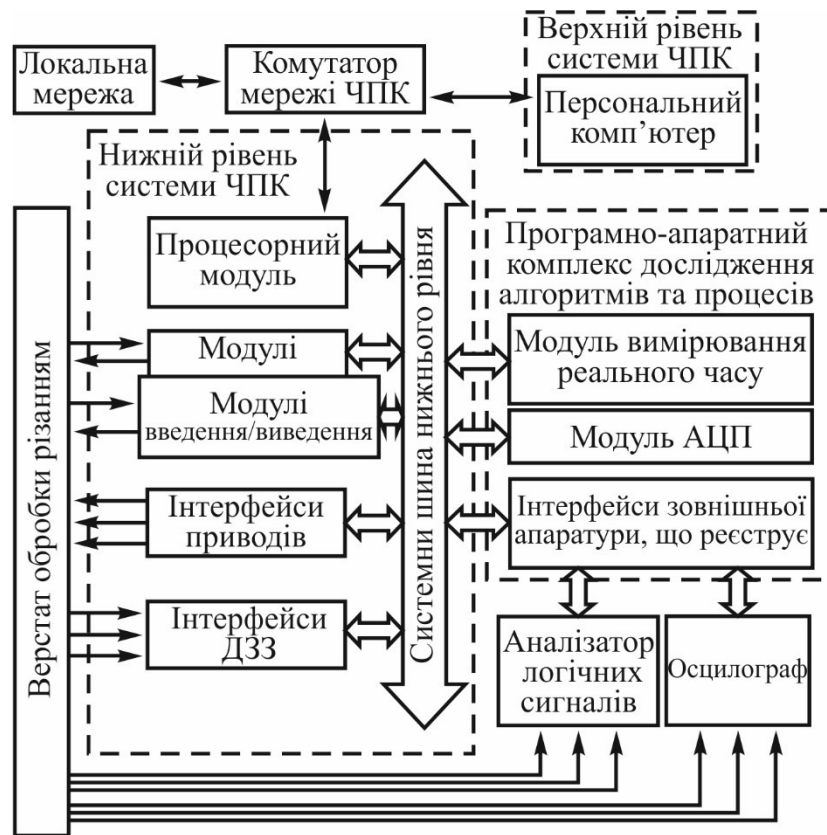


Рисунок 4.5 – Схема структури апаратного забезпечення системи ЧПК та програмно-апаратного комплексу для дослідження процесів та алгоритмів

Верхній рівень – це персональний комп'ютер, який працює на операційній системі Windows, що виконує комунікаційні, термінальні й деякі технологічні завдання керування.

Нижній рівень системи ЧПК – це персональний комп'ютер з підключеними до системної магістралі спеціалізованими пристроями сполучення: модулями для введення-виведення дискретних сигналів, модулями, що реєструють аналогові сигнали, інтерфейсами датчиків зі зворотним зв'язком. Нижній рівень забезпечується операційною системою з реальним часом та виконує диспетчеризацію, геометричні, логічні та технологічні завдання.

Розподілення завдань серед рівнів системи ЧПК надає змоги забезпечити максимально ефективну частоту циклу керування на рівні від 1000 до 2500 Гц.

Створення пристрою системи ЧПК для управління на базі материнської плати із сучасним процесором Intel Core i3 12-го покоління і оперативною пам'яттю DDR4 з об'ємом 2 Гб дозволяє одночасно з керуванням послідовності операцій генерації газової суміші здійснювати реєстрування необхідної кількості параметрів і оброблення даних від додаткового обладнання комплексу.

Організація магістрального обміну даними пристроїв сполучення з процесорним модулем забезпечить найвищу продуктивність та значну надійність обміну даними, це якнайкраще відповідає організації системи реєстрації великої кількості даних від пристроїв сполучення та внутрішніх змінних значень програмного забезпечення системи ЧПК.

До апаратного забезпечення комплексу належить апаратне забезпечення системи ЧПК із додатковим під'єднанням спеціальних модулів до системної магістралі: аналого-цифрового перетворення, вимірювання реального часу та управління зовнішніми пристроями, що реєструють дані.

Оснащення технологічного устаткування для генерації газової суміші, системою ЧПК із додатковим апаратним забезпеченням надасть можливість проведення технологічних експериментів на реальному обладнанні, що дозволить отримувати найбільш достовірні результати.

Таким чином, вищезазначена апаратна частина програмно-апаратного комплексу, яка інтегрована до системи ЧПК, уможлиблює проведення експериментів та дослідження процесу генерації газової суміші на реальному обладнанні.

4.3.3 Програмна частина

Для створення програмного забезпечення комплексу за основу прийнято двокомп'ютерну структуру програмного забезпечення системи ЧПК (рис. 4.6).

Програмне забезпечення верхнього рівня розроблено у Microsoft Visual C++ та сформовано із двох підсистем: підсистеми оброблення даних та підсистеми керування процесом реєстрації даних [35].

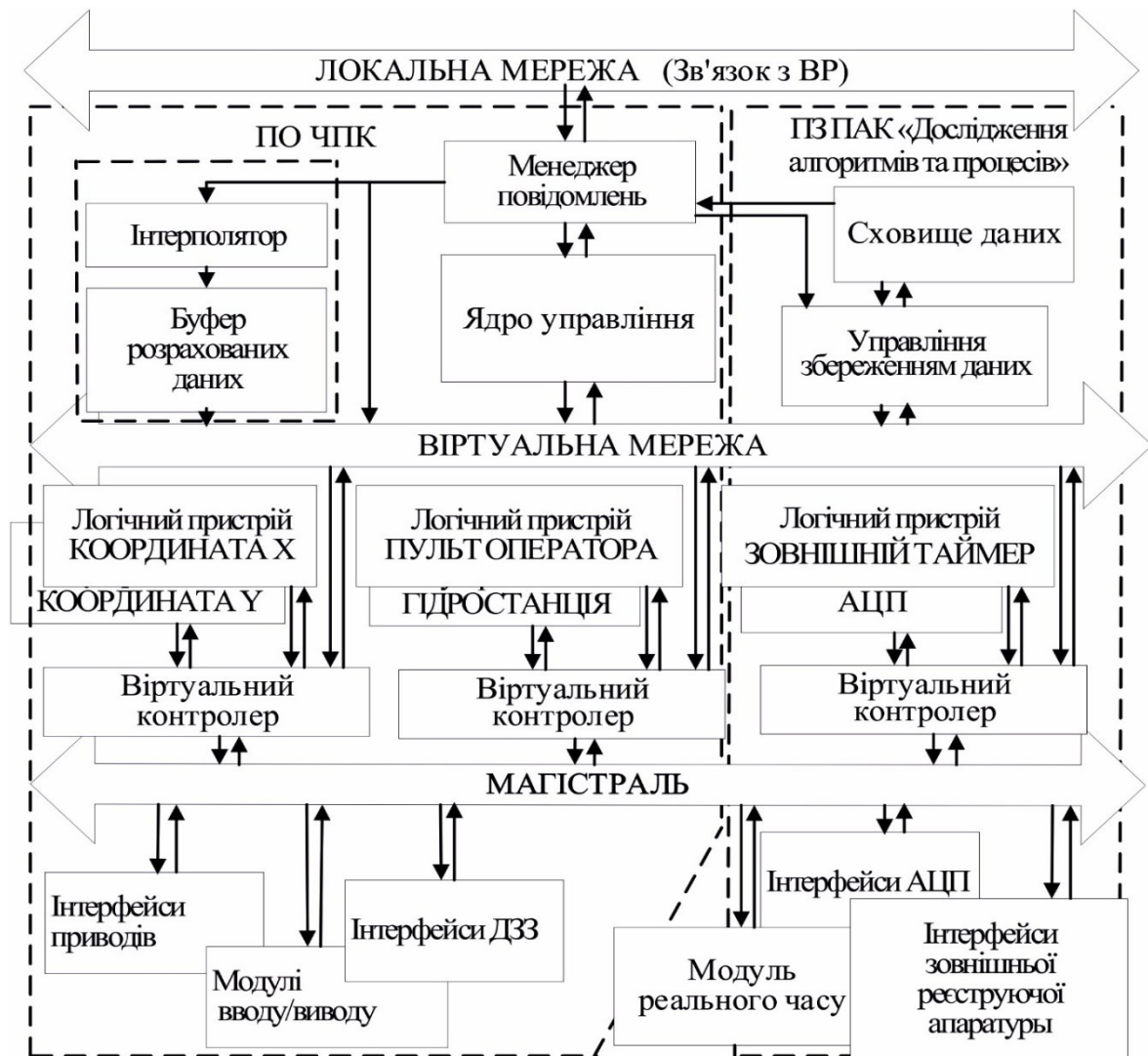


Рисунок 4.6 – Схема структури програмного забезпечення системи ЧПК і програмно-апаратного комплексу для дослідження процесів та алгоритмів

Керування процесом реєстрації приведено у відповідність до управління технологічним устаткуванням та виконується за допомогою команд, які передаються через локальну мережу системи ЧПК на персональний комп'ютер нижнього рівня. Підсистема оброблення даних надає можливість візуалізувати будь-який масив зареєстрованих даних із необхідної кількості експериментів, а також перетворювання цих даних, вираховування амплітудо-частотної

характеристики та здійснювання експорту даних до інших програмних продуктів таких, як Excel та Mathcad.

Керування окремими пристроями устаткування виконується за допомогою програмно реалізованих автоматів логічних пристроїв. Зазначені логічні пристрої об'єднані по віртуальних контролерах. Ядро керування сприяє забезпеченню взаємодії пристроїв завдяки розсиланню команд та повідомлень контролерам через внутрішню віртуальну мережу. Обмін даними віртуальних контролерів з фізичними інтерфейсами відбувається із перетворенням в адресний простір віртуальних контролерів. Приєднання до комплексу систем спеціальних інтерфейсів не руйнує загальну структуру програмного забезпечення. Обмін даними віртуальних контролерів з додатковими спеціальними інтерфейсами виконується за аналогічною схемою обміну даних з інтерфейсами системи ЧПК.

Для зазначеного комплексу спеціально розроблено модуль керування збереженням даних. Цей модуль забезпечує функцію збирання та збереження даних про процеси в оперативній пам'яті, які здійснюються на програмному рівні в системі ЧПК та даних фізичних процесів, що протікають у технологічному устаткуванні. Модулем керує ядро, куди надходять дані з логічних пристроїв [37].

Модуль керування збереженням даних надає можливість використання двох режимів: режиму «Реєстрація параметрів» та режиму «Аварійне збереження параметрів».

При застосуванні режиму «Реєстрація параметрів» початок та завершення процесу збереження даних здійснюється командою, яка передається з верхнього рівня на нижній. Процес реєстрації даних виконується з кожним тактом роботи зазначеної системи. Обмеження реєстрації за часом складає не менше ніж 60 секунд. Із кожного керованого агрегата можна реєструвати до двохсот змінних. Масив даних визначається у процесі конфігурації системи. Конфігурування даних, збережених у конкретному файлі технологічного циклу або експерименту, прописується в заголовкові

файлу, це дозволяє реалізовувати подальше оброблення даних для обладнання різноманітної конфігурації. Зазначений режим застосовується при проведенні досліджень алгоритмів та різних процесів у технологічному обладнанні.

При застосуванні режиму «Аварійне збереження параметрів» активізується процес збереження даних при збої в роботі устаткування. При аварійних ситуаціях, таких як спрацювання сигналізатора підвищеного вмісту робочих газів в приміщенні або решти критичних систем, реалізується алгоритм зупинки роботи устаткування та збереження у окремому файлі всіх параметрів та показників роботи системи ЧПК не менше 40 секунд, які передували виникненню цієї обставини. Режим може використовуватись для налагодження алгоритмів керування пристроями та діагностики відмов.

Отже, програмна складова програмно-апаратного комплексу, інтегрованого до системи ЧПК, надає можливість проводити експерименти на реальному устаткуванні, що дозволяє здійснювати збирання масивів об'єктивних даних при дослідженні операцій генерації газової суміші на устаткуванні із системою ЧПК для налаштування технологічної системи при різних режимах у її роботі. Програмно-апаратний комплекс надає можливість реєстрації більшого обсягу об'єктивних даних щодо взаємодії різних підсистем, наприклад: процеси енергоспоживання технологічної системи, процеси наповнення робочої камери газовими компонентами й управління автоматикою. Змінні, кількість яких потрібна для виконання експериментів та доступна при реєстрації для всіх координат керування становить від 150 до 200 параметрів, що забезпечує можливість реалізувати будь-які робочі режими устаткування з реєстрацією усіх параметрів.

4.3.4 Логічні пристрої, керування структурними елементами генератора газової суміші в системі ЧПК

Під час створення програмного забезпечення системи ЧПК генератора газової суміші використано метод розподілу всього комплексу на структурні складові. Для кожної структурної складової комплексу в просторі

відображення параметрів сформовано логічні пристрої. Логічний пристрій як поняття можливо визначити так: виокремлення групи вхідних і вихідних сигналів та програмних параметрів, які взаємопоєднані за визначеною логічною ознакою й описують функціонування окремого структурного елемента комплексу.

Логічний пристрій є програмним кінцевим автоматом, у кожному стані якого можливе виконання однієї з дій: оброблення сигналів, контроль і перехід до нового стану. Спрощену схему функціонування логічного пристрою наведено на рис. 4.7 [35]. У станів логічних пристроїв або автоматів є деякі значення, під котрими розуміють виконання певних дій. Уніфікований алгоритм роботи логічного пристрою керування дискретними сигналами залишається незмінним незалежно від кількості сигналів, які поєднані в одному автоматі.

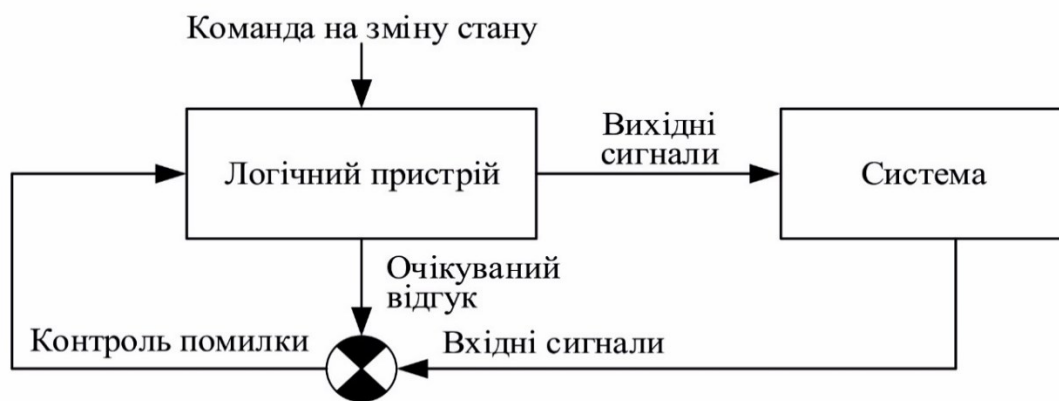


Рисунок 4.7 – Схема роботи логічного пристрою

Під час отримання команди щодо зміни стану логічним пристроєм встановлюються відповідні рівні вихідних сигналів та очікуються відгуки системи з контролем вхідних сигналів. У разі коли до логічного пристрою не надходить необхідний йому відгук системи, або він змінився з часом, система фіксує помилку. Під час чого логічний пристрій змінює свій стан на «Помилка», фіксує причину аварії і змінює вихідний вплив для уникнення подальшого пошкодження обладнання.

Сукупність логічних пристроїв становить логічний ступінь системи ЧПК. «Рівень управління» як спеціальна складова програмного забезпечення ЧПК організовує взаємодію логічних пристроїв системи через їх переведення з одного стану до іншого завдяки дії поточних команд і залежно від поточного положення пристроїв.

Вихідні впливи зазначених логічних пристроїв і отримання початкової інформації щодо стану структурних елементів цього комплексу реалізовується завдяки пристрою поєднання у вигляді портів введення-виведення дискретних сигналів та інтерфейсів цифро-аналогового перетворювача та аналогово-цифрового перетворювача, інтерфейсів оброблення сигналів енкодерів. Зазначені пристрої перетворюють фізичні сигнали в логічні й навпаки. Масив пристроїв поєднання, які виконують функції сполучних ланок між датчиками, виконавчими пристроями обладнання і програмним рівнем, становить фізичний рівень у системі (рис. 4.8) [35].

Крім структурних складових комплексу, які управляються вищерозглянутими простими логічними пристроями системи ЧПК, реалізовано логічні пристрої з регулюванням фактичного положення. У зазначених пристроях (рис. 4.8) змінення стану логічного пристрою спричиняє змінення стану, який управляє режимом функціонування регулятора положення. Як положення можна розглядати будь-які інші параметри логічного пристрою.

Відповідно до вищеописаного принципу декомпозиції об'єкта керування було виокремлено такі логічні пристрої з регулюванням положення, які реалізують чотирикоординатне керування процесом генерації газової суміші:

- проміжна ємність кисню;
- проміжна ємність метану;
- проміжна ємність азоту;
- проміжна ємність повітря.

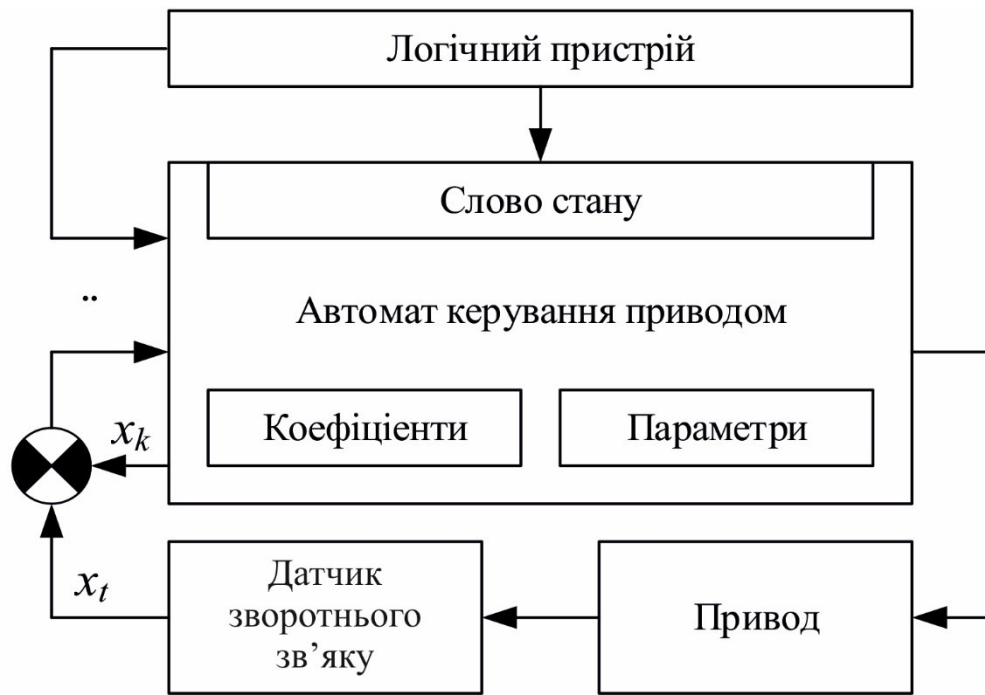


Рисунок 4.8 – Схема роботи логічного пристрою з регулюванням положення

4.4 Забезпечення безпеки при роботі з устаткуванням

Згідно з вимогами законодавчих і нормативно-правових актів з охорони праці й промислової безпеки, правил охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском, технічного регламенту обладнання, що працює під тиском, ДСТУ EN ISO/IEC 17020:2014, ДСТУ ISO 9001:2015 [28, 55, 47, 17, 19] до роботи із автоматизованим блоком генерування паливної суміші допускається персонал не молодше 18 років, ознайомлений з його конструкцією та принципом роботи, пройшов інструктаж з охорони праці і перевірку знань в установленому порядку.

Генератор газової суміші під'єднується до електричної мережі, це надає змогу здійснювати управління її роботою. Перш ніж розпочинати роботу з обслуговування електроустаткування блока генерації газової суміші, необхідно впевнитись у тому, що вимикач живлення устаткування встановлений у розімкнене положення «0». У разі коли устаткування перебуває під напругою при відкритій кришці, виникає небезпечна ситуація

підвищеного рівня. У цьому разі операції має виконувати досвідчений персонал. Ні в якому разі не можна відключати системи безпеки установки.

Перед підключенням до електромережі перевірити відповідність наявної частоти і струму. Застосовуючи вольтметр провести перевірку напруги, впевнитись у відсутності перепадів напруги або зниженої напруги понад 10 %.

Монтаж електроустаткування і заземлення системи генерації паливної суміші повинні відповідати вимогам: ПУЭ, «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів» [30], «Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів» [27].

Генератор газової суміші необхідно розміщувати на спеціально задалегіть підготовленому місці з відповідним закріпленням, яке повинно бути виготовленим з негорючого та міцного матеріалу, що може витримати вагу генератора впродовж експлуатації. Геометрію основи можна визначити, узявши за основу габаритні розміри генератора газової суміші. Приміщення повинне відповідати діючим правилам безпеки, проектування і будівництва промислових підприємств. Навколо місця розташування необхідно передбачити вільний простір з усіх боків від габаритів генератора (окрім сторони кріплення до устаткування) для забезпечення доступу при проведенні робіт з експлуатації і обслуговуванню та уникнення можливих складнощів. Генератор газової суміші не повинен експлуатуватися в приміщеннях, в яких існує ризик, пов'язаний з причинами, які відрізняються від звичайної роботи, викликані наявністю вогне- або вибухонебезпечних речовин.

Приміщення, де встановлена система генерації газових сумішей має бути обладнане вентиляційною системою, це забезпечує санітарно-гігієнічні норми згідно з ДСН 3.3.6.042-99 [43].

У випадку викорисання в системі генерації газових сумішей вибухопожежонебезпечних речовин, приміщення повинно бути оснащено автоматичними засобами контролю параметрів, значення яких визначають вибухопожежонебезпечність процесу, сигналізацією граничних значень і

системами блокувань, які перешкоджають виникненню аварійних ситуацій [29].

Необхідно регулярно забезпечувати контроль і техобслуговування генератора газової суміші. Перш ніж підключати та приступати до роботи з додатковим приладами та устаткуванням, завжди перевіряти технічну документацію та інструкції. Роботи на генераторі газової суміші завжди повинен виконувати персонал відповідної кваліфікації.

Операторові, котрий обслуговує систему генерації газових сумішей, забороняється:

- відкривати пульт управління системи при працюючому устаткуванні, електричні шафи;
- працювати і обслуговувати блок генерування з знятими кожухами, огорожуваннями і блокуваннями;
- залишати робоче місце без нагляду.

Складові технічного обслуговування:

- щоденного технічного обслуговування;
- щомісячного технічного обслуговування.

Складові щоденного технічного обслуговування:

- перевірка наявності справних захисних огорожень;
- спостереження за справною роботою системи генерації паливної суміші, арматури і трубопроводів;
- спостереження за справністю заземлення системи генерації паливної суміші, пристроїв і пульта управління;
- спостереження за станом пускорегулюючих апаратів і приладів;
- спостереження за роботою електроприводів.

Складові щомісячного технічного обслуговування:

- очищення й обтирання елементів системи генерації паливної суміші;
- спостереження за станом з'єднань;
- спостереження за функціонуванням вимірювальних приладів.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено систему генерації багатокомпонентної газової суміші для процесів фізико-технічної обробки на базі удосконаленого методу критичних отворів в якому компоненти суміші подають з попередньо наповнених до початкового тиску проміжних посудин регульованого об'єму, що дозволяє отримувати газові суміші з відхиленням відсоткового складу за масою на рівні до 0,1 %.

2. Розроблено алгоритм управління генерацією суміші на термоімпульсному устаткуванні. Показано необхідність управління швидкістю відкриття та закриття клапанів подачі газів з урахуванням необхідного значення співвідношення площ критичних отворів. Представлена послідовність керування роботою системи дозування та приготування паливної суміші.

3. Визначені вимоги для створення системи числового програмного керування генератором газової суміші. Пропонується чотирикоординатне керування процесом генерації двокомпонентної газової суміші з додатковими двома компонентами на базі рішень, які застосовуються у верстатах обробки різанням. Показана необхідність реєстрування та запис технологічних даних для забезпечення можливості аналізування після завершення циклу генерації газової суміші.

4. Розроблені правила безпечної експлуатації системи генерації газової суміші згідно з вимогами законодавчих і нормативно правових актів та правил з охорони праці та промислової безпеки.

Основні наукові результати, наведені в четвертому розділі, опубліковано в роботах автора [41, 1, 24].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Удосконалено метод отворів із критичним перерізом для генерації багатокомпонентних газових сумішей, що полягає в подачі компонентів з посудин, що передбачають регулювання об'єму, згідно з виконанням умови забезпечення рівності температур газів у посудинах під час їхнього перетікання, що дозволяє забезпечувати задане масове співвідношення компонентів у робочій посудині із сумішшю без додаткового регулювання.

2. Розроблено аналітичні та числові моделі, які дозволяють визначити об'єми та початковий тиск у посудинах з компонентами газової суміші для удосконаленого методу отворів із критичним перерізом.

3. Розроблено методику визначення характеристик системи генерації багатокомпонентної газової суміші, яка дозволяє отримати необхідні параметри, необхідні для формулювання закону керування виконавчими елементами, що забезпечує необхідну точність дозування компонентів.

4. Розроблено систему генерації багатокомпонентної газової суміші на базі удосконаленого методу отворів із критичним перерізом. Новизна запропонованих технічних рішень підтверджена патентами України на винахід та корисні моделі. Проведено експериментальні випробування розробленої системи, які підтвердили можливість реалізації запропонованого способу генерації газових сумішей для процесів фізико-технічної обробки.

5. Розроблено алгоритм керування генерацією суміші на термоімпульсному устаткуванні. Показано необхідність керування швидкістю відкриття та закриття клапанів подачі газів з урахуванням необхідного значення співвідношення площин критичних перерізів отворів. Представлена послідовність керування роботою системи дозування та приготування паливної суміші.

6. Показано, що перспективним напрямом використання розроблених числових моделей системи генерації газових сумішей на базі удосконаленого

методу є побудова цифрового близнюка, у якому закони керування роботою систем мають корегуватися з урахуванням даних онлайн моніторингу технологічних параметрів від вбудованих датчиків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алгоритм управління системою генерації суміші для прецизійної термоімпульсної обробки / Планковський С. І., Шипуль О. В., Трифонов О. В., Заклінський С. О. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2018. № 5 (149). С. 58–66. URL: <https://doi.org/10.32620/akt.2018.5.09>
2. Борисова О. С. Совершенствование способов дозирования энергии при финишной термоимпульсной очистке прецизионных деталей летательных аппаратов : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.02 / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2011. 152 с.
3. Газ природний паливний компримований для двигунів внутрішнього згоряння. Технічні умови: ДСТУ 27577:2005. Чинний від 01.07.2006. Київ : Держпотребстандарт, 2006. 10 с.
4. Герасименко В.П. Теорія авіаційних двигунів. Підручник. Харків : Нац. аерокосм. ун-т «Харків. авіац. ін-т», 2003. 199 с. URL: <https://k201.khai.edu/wp-content/uploads/2021/04/metod-N78-1.pdf>
5. ДСТУ 4028-2001 «Манометри та калібратори надлишкового тиску поршневі»
6. Застосування іонноплазмового термоциклічного азотування для підвищення зносостійкості високолегованої сталі / Ляшенко Б. А.; Рутковський А. В.; Кумуржі О. Ю.; Антонюк В. С.; Качинський Д. О.; Томашук В.С. // *Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки*, 2015. № 3 (74). URL: <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/2491>
7. Кайдалов А.А., Гаврик А.Н. Эффективность застосування захисних газових сумішей при дуговому зварюванні сталей // *Сварщик*, 2011. №4, С. 28–31.
8. Кисень газоподібний для життєзабезпечення на борту літальних апаратів ДСТУ ISO 2046:2018 (ISO 2046:1973, IDT). Чинний від 01.01.2019. ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2019.

9. Кривцов В. С., Сорокин В. Ф., Комбаров В. В. Проблемы сплайновой интерполяции с гладко-ограниченными кинематическими параметрами движения в задачах числового программного управления высокоскоростным оборудованием // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012. № 9 (96). С. 11–19.

10. Кулик М. С. Конструкція, міцність та надійність газотурбінних установок і компресорів : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / М. С. Кулик, О. А. Тамаргазін, В. В. Козлов. Київ : Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. 477 с.

11. Лухтура Ф. І. До питання про сталий режим витікання газу з вісосиметричних отворів та сопел // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2015. Вип. 30, Т.1. С. 213-225.

12. Матеріали зварювальні. Захисні гази для дугового зварювання та різання. ДСТУ EN ISO 14175:2014. URL: <http://www.kriopass.com.ua/content/dstu-iso-141752004-materialy-svarochnye-zashchitnye-gazy-dlya-dugovoy-svarki-i-rezki>

13. Методика розрахунку теплових потоків при термоімпульсній обробці детонуючими газовими сумішами / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, Є. С. Палазюк, С. О. Красовський // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2014. № 6(113). С.17–23.

14. Мікроманометри рідинні типу МКМ, методика повірки (калібрування) ДСТУ 7225:2011. Чинний від 02.02.2011. Національний науковий центр «Інститут метрології», 2011. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=67910

15. Моделювання процесу оплавлення задирок при термоімпульсній обробці детонуючими сумішами / Планковський С.І., Гайдачук О.В., Шипуль О.В., Палазюк Є.С. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 2013. № 3. С. 4–11.

16. Моделювання теплообміну при загасанні ударних хвиль в замкнутій камері / Планковський С. І., Шипуль О. В., Трифонов О. В., Палазюк Є. С.,

Малашенко В. Л. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2014. № 1. С. 104–109.

17. Настанови щодо проведення аудитів систем управління. ДСТУ ISO 19011:2018.

18. Основи створення «цифрового близнюка» газонаповнювальної системи термоімпульсної установки / Гарін В. О., Заклінський С. О., Трифонов О.В. // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., 28-29 квіт. 2020 р. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2020. С. 30.

19. Оцінка відповідності. Вимоги до роботи різних типів органів з інспектування. ДСТУ EN ISO/IEC 17020:2014.

20. Планковський С. І., Заклінський С. О. Проектування сопла для підготовки газової суміші при термоімпульсній обробці прецизійних деталей літальних апаратів // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., 17-18 квіт. 2018 р. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2018. С. 51.

21. Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. Вибір методу підготовки газової суміші для термоімпульсної обробки // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., 20-21 квіт. 2017 р. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2017. С. 59.

22. Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. Застосування сопел надкритичного витікання для швидкісного вимірювання об'єму посудин // Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2020. № 4 (164). С. 66–73. URL: <https://doi.org/10.32620/aktt.2020.4.08>

23. Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. Моделювання генератора паливної суміші термоімпульсної установки // Новые технологии в машиностроении : тезисы докл. XXIX междунар. конф. 3-8 сент. 2019 г.

Коблеве – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2019. С. 94.

24. Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. Особливості конструкції газонаповнювальної системи термоімпульсної установки // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., 23-24 квіт. 2019 р. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2019. С. 59.

25. Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. Шляхи створення прецизійної системи сумішеутворення для термоімпульсної обробки // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні : тези доп. всеукр. наук.-техн. конф., 15-17 листоп. 2016 р. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2016. Т. 1. С. 34.

26. Планковський С.І., Шипуль О.В., Заклінський С.О. Перспективи застосування сучасних методів генерації газових сумішей для прецизійної термоімпульсної обробки // Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2017. № 3 (138). С. 85–93. URL: <http://nti.khai.edu/ojs/index.php/aktt/article/download/aktt.2017.3.06/552>

27. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів ДНАОП 0.00-1.21-98. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98#Text>;

28. Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском затверджені Наказом Міністерства соціальної політики України від 05.03.2018 № 333. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0433-18#Text>

29. Правила пожежної безпеки в Україні затверджені Наказом Міністерства внутрішніх справ України від 30.12.2014 № 1417. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#Text>

30. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів Затверджено Наказом Міністерства палива та енергетики 25.07.2006 № 258 Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 25 жовтня 2006 р. за № 1143/13017. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#n20>;

31. Призначення режимів обробки для автоматизованих термоімпульсних установок в умовах інформаційно-інтегрованого виробництва / Планковський С. І., Шипуль О. В., Малашенко В. Л., Козлов В. Г. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2012. № 56. С. 67-77.

32. Применение защитных газов в сварочном производстве (Обзор) / Патон Б. Е., Римский С. Т., Галинич В. И. // Автоматическая сварка. 2014. № 6-7 (733). С. 17–24 URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/102104>

33. Природний газ. Настанови щодо відбирання проб : ДСТУ ISO 10715:2009. Чинний від 01.01.2011. Державне підприємство Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів (Укрметртестстандарт), 2011. URL: <http://shop.uas.org.ua/ua/katalog-normativnih-dokumentiv/75-nafta-y-sumizhni-tekhnologiyi/prirodniy-gaz-nastanovi-schodo-vidbirannja-prob.html>

34. Природний газ. Розширений аналіз. Метод газової хроматографії : ДСТУ ISO 6975:2012. Чинний від 21.12.2012. Науково-дослідний інститут нафтогазової промисловості (ДП «Науканафтогаз»), 2012. URL: <http://shop.uas.org.ua/ua/prirodniy-gaz-rozshirenij-analiz-metod-gazovoi-hromatografii.html>

35. Программно-аппаратный комплекс для исследования алгоритмов и процессов в станках с ЧПУ / В. С. Кривцов, Е. В. Комбарова, Р. В. Варнас, Е. А. Аксенов // Авиационно-космическая техника и технология. 2011. № 4 (81). С. 5–11.

36. Розробка автоматизованого комплексу для прецизійного термоімпульсного оброблення детонуючими газовими сумішами звіт про НДР / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т» кер.: Планковський С.; викон.: Шипуль О. та ін. № ДР 0117U002500. Харків, 2017. 130 с.

37. Розробка автоматизованого комплексу для прецизійного термоімпульсного оброблення детонуючими газовими сумішами звіт про НДР

«Створення дослідно-промислового зразка автоматизованого комплексу для прецизійного термоімпульсного оброблення» / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т»; кер. Планковський С. І.; викон.: Шипуль О. В. та ін. № ДР 0117U002500. Харків, 2018. 213 с.

38. Розробка складу робочої суміші газів для підвищення якості катодів на основі нікелю для іонно-плазмового напилення / Ефанов В. С., Шевченко В. Г., Шалева Н. В., Омельченко О. С, Омельченко В. А // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, 2020, № 4 (267-268). С. 52–59. DOI:10.30838/J.BPSACEA.2312.010920.52.654. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/212432/212571>

39. Розробка технологій та технічних рішень для автоматизованих промислових установок прецизійної обробки деталей агрегатів ГТД детонуючими газовими сумішами : звіт з НДР (проміжн.) / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т» ; керівн. Планковський С. І.; викон.: Шипуль О. В. та ін. № ДР 0220U102076. Харків, 2019. 101 с.

40. Розробка цифрового близнюка наповнення резервуару газовою сумішшю / Гарін В. О., Ткаченко Д. А., Шипуль О. В., Заклінський С. О, Трифонов О. В, Планковський С. І. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2022. № 5 (183). С. 40–50. URL: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.5.03>

41. Розроблення автоматизованого комплексу для прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами: наукові матеріали : монографія / Планковський С. І., Шипуль О. В., Цегельник Є. В., Трифонов О. В., Коритченко К. В., Баранов О. О., Сисоєв Ю. О., Гарін В. О., Аксьонов Є. О., Комбаров В. В., Заклінський С. О.; за ред. Планковського С. І. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2020. 318 с.

42. Розроблення конструкції регульованого сопла лавалю / Михайлюк В. В., Лях М. М., Процюк В. Р., Дейнега Р. О., Витриховський Є. А., Стецюк Р. Б. // Oil and Gas Power Engineering, 2022, № 2(38), p. 85-92 URL: [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2\(38\)-85-92](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2(38)-85-92)

43. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text>;

44. Сисоєв А. Ю. Розробка та дослідження генератора сумішей газів для отримання складнокомпозиційних іонно-плазмових покриттів : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07 / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». Харків, 2011. 181 с.

45. Сисоєв Ю. О. Наукові основи забезпечення ефективного перебігу і контролю іонно-плазмових процесів для вакуумно-дугових технологій : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.07 / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». Харків, 2014. 462 с.

46. Сисоєв Ю. О. Технологія машинобудування. Забезпечення ефективності процесів отримання вакуумно-дугових покриттів : монографія. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. 320 с.

47. Системи управління якістю. Вимоги ДСТУ ISO 9001:2015.

48. Спосіб визначення об'єму посудини патент України на корисну модель № 147610, МПК G01F 17/00, заяв. 30.11.2020; опубл. 26.05.2021, Бюл. № 21 URL: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=147610&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

49. Спосіб визначення об'єму посудини, патент України на корисну модель № 147597, МПК G01F 17/00, заяв. 15.10.2020; опубл. 26.05.2021, Бюл. № 21 URL: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=147597&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

50. Спосіб генерації газової суміші, патент України № 125380, МПК B01F3/02, B01F 13/00, G05D 11/00, заяв. 17.10.2018; опубл. 02.03.2022, Бюл. № 9 URL: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=

2&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=125380&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

51. Спосіб приготування газової суміші заданого складу, патент України на корисну модель № 146262, МПК В01F 3/00, заяв. 10.09.2020; опубл. 03.02.2021, Бюл. № 5 URL: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=146262&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

52. Спосіб приготування суміші з n газів заданого процентного складу патент України № 112566, МПК В01F 3/02, G06D 11/00 МПК В01F3/02, G05D11/00 заяв. 07.07.2014; опубл. 26.09.2016, Бюл. № 18/2016 URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=112566&form-1-param_type=6&form-1-value=%D0%A1%D0%B8%D1%81%D0%BE%D1%94%D0%B2

53. Стратегия модернизации основных производственных фондов предприятий авиационной промышленности / А. К. Мялица, Ю. А. Раисов, В. Ф. Сорокин, В. В. Комбаров // Технологические системы 2003. № 1. С. 32–41.

54. Сумішоутворення в камерах термоімпульсних машин при обробці деталей агрегатів двигунів ЛА / Планковський С. І., Шипуль О. В., Трифонов О. В., Козлов В. Г. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2010. № 9 (76). С. 7–11.

55. Технічний регламент обладнання, що працює під тиском, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 16 січня 2019 р. № 27. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/27-2019-%D0%BF#top>

56. Фойту О. В. Вдосконалення технології виготовлення поздовжнього силового набору літака з застосуванням високошвидкісної обробки на обладнанні з ЧПК : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.02 / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». Харків, 2017. 194 с.

57. Числове дослідження змішування в системі генерації газової суміші / Гайдачук В.Є., Шипуль О.В., Заклінський С.О., Гарін В.О., Трифонов О.В., Планковський С.І. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2021. № 6 (176). С. 39–47. URL: <https://doi.org/10.32620/aktt.2021.6.05>

58. Числове та еспериментальне дослідження наповнення резервуару компонентом газової суміші / Шипуль О. В., Заклінський С. О., Комбаров В. В., Павленко О. А., Гарін В. О. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2021. № 4 (172). С. 63–72. URL: <https://doi.org/10.32620/aktt.2021.4.09>

59. Шевченко С. А. Экспериментальное исследование динамических характеристик регулятора давления газа в системе запуска ЖРД многократного включения // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. Вып. 4, 2015. С. 49–68.

60. Шипуль О. В. Тенденции развития прецизионного производства // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. Вып. 1(81). Харьков, 2015. С. 77–90.

61. A digital twin design of induction motor with squirrel-cage rotor for insulation condition prediction / Pliuhin V., Zaklinsky S., Plankovsky S., Tsegelnyk Y., Aksonov O., Kombarov V. // *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, 2023, Issue 14. P. 185–191. URL: https://ijomam.com/wp-content/uploads/2023/11/pag.-185-191_A-digital-twin-design-of-induction-motor-with-squirrel-cage-rotor-for-insulation-condition-prediction.pdf

62. A Method of Rapid Measurement of Vessels Volume with Complex Shape by Critical Nozzles / Plankovsky S., Shypul O., Zaklinsky S., Tsegelnyk Y., Kombarov V. (2021). In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds) // *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering*. 2020. ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 188. Springer, Cham. P. 247–255. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_20

63. A scale-adaptive simulation model for turbulent flow predictions / F.R. Menter, M. Kuntz, R. Bender // AIAA Paper 2003-0767. 2003. P. 40.
64. ANSYS CFX Reference Guide. URL: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=CFX&pid=CFX&lang=en. (accessed 12.10.2021).
65. ANSYS Fluent Reference Guide. Available. URL: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=Fluent&pid=Fluent&lang=en (accessed 14.02.2022).
66. ANSYS Twin Builder Reference Guide. Available. URL: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=Twin%20Builder&pid=TwinBuilder&lang=en (accessed 14.02.2022).
67. Arias-Zugasti M. Efficient calculation of multicomponent diffusion fluxes based on kinetic theory / M. Arias-Zugasti, P. L. Garcia-Ybarra, J. L. Castillo // Combustion and Flame. 2016. Vol. 163. P. 540–556. URL: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.10.033>
68. Basic throttling schemes of gas mixture synthesis systems / I. Dilay, Z. Teplukh, Yu. Vashkurak // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 4. No. 8(70). 2014. P. 39–45.
69. Cimino C. Review of digital twin applications in manufacturing / C. Cimino, E. Negri, L. Fumagalli // Computers in Industry. 2019. Vol. 113. P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130>
70. Creating a mixture of gases for ion-plasma technologies / Yuri Sysoiev, Vitaliy Rudenko, Andrey Dolomanov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol 2. No. 5(68). 2014. P. 15-19.
71. Development of a Digital Twin of Reservoir Filling by Gas Mixture Component / Shypul O., Garin V., Tkachenko D., Zaklinsky S., Tryfonov O., Plankovskyy S. // Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2022). Advances in Intelligent Systems and Computing. 2023. P. 85–98. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30251-0_7

72. Device for determining the volume of objects using a chamber with two resonators to compensate for temperature and humidity effects : 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.

73. Dynamic method of gas mixtures creation for plasma technologies / Plankovskyy S., Shypul O., Zaklinskyy S., Tryfonov O. // Problems of atomic science and technology. 2018. №. 6 (118). P. 189–193. URL: https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2018_6/article_2018_6_189.pdf

74. Enabling technologies and tools for digital twin / Q. Qinglin, T. Fei, H. Tianliang, et al. // Journal of Manufacturing Systems. 2021. Vol. 58 (B). P. 3–21. DOI:10.1016/j.jmsy.2019.10.001.

75. Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods Part 1: Methods of calibration. ISO 6145-1:2003. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/24667/0c6180a8816549e6ba6a33f7cc74ea2d/ISO-6145-1-2003.pdf> (дата звернення 26.10.2015).

76. Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic methods. Part 2: Piston pumps. ISO 6145-2:2014.

77. Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods. Part 4: Continuous syringe injection method. ISO 6145-4:2004.

78. Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods. Part 5: Capillary calibration devices. ISO 6145-5:2009.

79. Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods. Part 6: Critical orifices. ISO 6145-6:2003. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/28433/da71095dc9fd4982b1d3669b8a07d9c9/ISO-6145-6-2003.pdf> (дата звернення 26.10.2015).

80. Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods. Part 7: Thermal mass-flow controllers. ISO 6145-7:2009.

81. Generator of gas mixtures for ion-plasma technologies / Iu. Sisoiev, I. Serdyuk, A. Dolomanov, D. Kovteba // Problems of atomic science and technology. 2017. №2 (108). P. 178–183.

82. Grotjans H. Menter F.R. Wall functions for general application CFD codes // ECCOMAS 98. Proceedings of the IV Europ. CFD Conf, John Wiley&Sons. 1998. P. 1112-1117.

83. High-accuracy stable gas flow dilution using an internally calibrated network of critical flow orifices / P. J. Brewer, B. A. Goody, T. Gillam at oth. // Measurement science and technology. 2010. Vol. 21, Num. 1, Article 115902.

84. Influence of argon on structure and properties TI-SI-N of the coating receive at vacuum-arc deposition in gas mixture “nitrogen+argon” / V.A. Belous, Yu. A. Zadneprovskiy, N.S. Lomino, O.V. Sobol // Problems of atomic science and technology. 2012. №5(81). P. 115–122.

85. Influence of the additives argon, O₂, C₄F₈, H₂, N₂ and CO on plasma conditions and process results during the etch of SiCOH in CF₄ plasma Author links open overlay panel / S. Zimmermann, N. Ahner, F. Blaschta, M. Schaller, H. Zimmermann, H. Rülke, N. Lang, J. Röpcke, S.E. Schulz, T. Gessner // Microelectronic Engineering Volume 88, Issue 5, May 2011, P. 671–676. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2010.07.001>

86. Kato Y. The standardization for the edge quality of the precise machining products / Y.K. Ohmri, E. Hatano, K. Takazawa // Advanced Materials Research, Volume 24, Proceedings 9th International symposium on precision surface finishing and deburring technology, 5-7 November, 2007, Suzhou, China. P. 83–90. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.24-25.83

87. Menter F .R., Kuntz M., Bender R. A scale-adaptive simulation model for turbulent flow predictions // AIAA. 2003. Paper 2003-0767. 40 p. DOI: 10.2514/6.2003-767.

88. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA-Journal. 1994. Vol. 32, no. 8. P. 269–289. DOI: 10.2514/3.12149

89. Nomenclature for chromatography Prepared for publication by L. S. Ettre / Pure & Appl, Chem., Printed in Great Britain 1993. Vol. 65, No. 4. P. 819–872. URL: <https://publications.iupac.org/pac/1993/pdf/6504x0819.pdf>

90. Numerical simulations of mixture formation to ensuring the quality of thermal deburring / S. Plankovskyy, O. Shypul, S. Zaklinskyy, Y. Tsegelnyk, O. Bezkorovaina // International Conference on Advanced Mechanical and Power Engineering (CAMPE 2021). October 29-30, 2021. Kharkiv, Ukraine. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Cham, Springer, 2022. P. 108–117. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-18487-1_11

91. Plasma parameters, gas-phase chemistry and Si/SiO₂ etching mechanisms in HBr+Cl₂+O₂ gas mixture: Effect of HBr/O₂ mixing ratio Author links open overlay panel / Byung Jun Lee, Alexander Efremov, Kwang-Ho Kwon // Vacuum Volume 163, May 2019, P. 110-118. URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.02.014>

92. Protectively doused valving device for a combustion chamber [Electronic resource] : pat. 3994668 USA : Int. Cl.2 F23D11/36. Appl. No. 05/606447 ; fil. 21.08.1975 ; publ. 30.11.1976. 5 p. URL: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/3994668> (last accessed: 08.04.2023).

93. Sato T. Influence of shielding gases on quality and efficiency in gas shielded arc welding // (2001) Welding International, 15 (8), P. 616–619. DOI: 10.1080/09507110109549413

94. Sysoiev Yu. The creation of multi-component gas mixtures for ion-plasma technologies // Problems of atomic science and technology. 2014. №2(90). P. 137–142.

95. The Role of Nitrogen Addition in C₄f₈/Ar Plasma to Modulate the Plasma Process from Polymerization to Etching / Woojin Park, and Jonggu Han, and Solee Park, Se Youn Moon // Vacuum Volume 216, October 2023, Page 112466: URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112466>

96. Topography versus Surface Chemistry and the Impact on Cell Viability / Dimitrios Kontziampasis, Tatiana Trantidou, Anna Regoutz, Eleanor J. Humphrey,

Daniela Carta, Cesare M. Terracciano, Themistoklis Prodromakis Effects of Ar and O₂ Plasma Etching on Parylene C: // Plasma Processes and Polymers Volume13, Issue 3. March 2016. P. 324–333. DOI: 10.1002/ppap.201500053

97. Tseng K. H., Chou C. P. Effect of nitrogen addition to shielding gas on residual stress of stainless steel weldments DOI 10.1179/136217101125000505

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, у яких опубліковані основні наукові результати дисертаційної роботи

Монографії (розділи у колективних монографіях)

1. Розробка генератора паливної суміші для прецизійного термоімпульсного оброблення / С. О. Заклінський та ін. // Розроблення автоматизованого комплексу для прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами наукові матеріали : монографія / Планковський С. І., та ін. ; ред. С. І. Планковський. – Харків, Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – 2020. – С. 134–171.

Статті в наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України

2. Планковський С.І. Перспективи застосування сучасних методів генерації газових сумішей для прецизійної термоімпульсної обробки / Планковський С.І., Шипуль О.В., Заклінський С.О. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2017. – № 3 (138). – С. 85–93. – Режим доступу: <http://nti.khai.edu/ojs/index.php/aktt/article/download/aktt.2017.3.06/552>

3. Алгоритм управління системою генерації суміші для прецизійної термоімпульсної обробки / Планковський С. І., Шипуль О. В., Трифонов О. В., Заклінський С. О. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2018. – № 5 (149). – С. 58–66. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/aktt.2018.5.09>

4. Планковський С. І. Застосування сопел надкритичного витікання для швидкісного вимірювання об'єму посудин / Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2020. – № 4 (164). – С. 66–73. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/aktt.2020.4.08>

5. Числове дослідження змішування в системі генерації газової суміші / Гайдачук В.Є., Шипуль О.В., Заклінський С.О., Гарін В.О., Трифонов О.В., Планковський С.І. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2021. – № 6

(176). – С. 39–47. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/aktt.2021.6.05>

6. Числове та еспериментальне дослідження наповнення резервуару компонентом газової суміші / Шипуль О. В., Заклінський С. О., Комбаров В. В., Павленко О. А., Гарін В. О. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – № 4 (172). – С. 63–72. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/aktt.2021.4.09>

7. Розробка цифрового близнюка наповнення резервуару газовою сумішшю / Гарін В.О., Ткаченко Д.А., Шипуль О.В., Заклінський С.О., Трифонов О.В, Планковський С.І. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2022. – № 5 (183). – С. 40–50. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.5.03>

8. Dynamic method of gas mixtures creation for plasma technologies / Plankovskyy S., Shypul O., Zaklinsky S., Tryfonov O. // *Problems of atomic science and technology*. – 2018. – №. 6 (118). – P. 189–193. – Режим доступу: https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2018_6/article_2018_6_189.pdf

Статті в наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію

9. A digital twin design of induction motor with squirrel-cage rotor for insulation condition prediction / Pliuhin V., Zaklinsky S., Plankovskyy S., Tsegelnyk Y., Aksonov O., Kombarov V. // *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. – 2023. – Issue 14. – P. 185–191. – Mode of access: <http://doi.org/10.17683/ijomam/issue14.22>

Патенти на винахід, що пройшли кваліфікаційну експертизу

10. Спосіб генерації газової суміші : патент України № 125380 : МПК B01F3/02, B01F 13/00, G05D 11/00 / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, С. О. Заклінський, Г. С. Тевзадзе. – № а201810303 ; заявл. 17.10.2018 ; опубл. 02.03.2022, Бюл. № 9. – 4 с. – Режим доступу: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=125380&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

11. Планковський С. І. Шляхи створення прецизійної системи сумішеутворення для термоімпульсної обробки / Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні : тези доп. всеукр. наук.-техн. конф., [Харків], 15-17 листоп. 2016 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2016. – Т. 1. – С. 34.

12. Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. Вибір методу підготовки газової суміші для термоімпульсної обробки // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., [Харків], 20-21 квіт. 2017 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т». – Харків, 2017. – С. 59.

13. Планковський С. І. Проектування сопла для підготовки газової суміші при термоімпульсній обробці прецизійних деталей літальних апаратів / Планковський С. І., Заклінський С.О. // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., [Харків], 17-18 квіт. 2018 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2018. – С. 51.

14. Планковський С. І. Особливості конструкції газонаповнювальної системи термоімпульсної установки / Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., [Харків] 23-24 квіт. 2019 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2019. – С. 59.

15. Планковський С. І. Моделювання генератора паливної суміші термоімпульсної установки / Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. // New leading technologies in machine bulding : proceedings XXIX international conference., [Koblevo – Kharkiv], 3-8 sept. 2019 / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2019. – С. 94.

16. Гарін В. О. Основи створення «цифрового близнюка» газонаповнювальної системи термоімпульсної установки / Гарін В. О., Заклінський С. О., Трифонов О.В. // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., [Харків], 28-29 квіт. 2020 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2020. – С. 30.

17. A Method of Rapid Measurement of Vessels Volume with Complex Shape by Critical Nozzles / Plankovsky S., Shypul O., Zaklinsky S., Tsegelnyk Y., Kombarov V. (2021). In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds) // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2020. ICTM 2020 / Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. – vol 188. – P. 247–255. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_20

18. Numerical simulations of mixture formation to ensuring the quality of thermal deburring / S. Plankovsky, O. Shypul, S. Zaklinsky, Y. Tsegelnyk, O. Bezkorovaina // International Conference on Advanced Mechanical and Power Engineering (CAMPE 2021). October 29-30, 2021 / Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham. – 2022. – P. 108–117. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-031-18487-1_11

19. Development of a Digital Twin of Reservoir Filling by Gas Mixture Component / Shypul O., Garin V., Tkachenko D., Zaklinsky S., Tryfonov O., Plankovsky S. // Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2022) / Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2023. – P. 85–98. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30251-0_7

Список наукових публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації

20. Спосіб визначення об'єму посудини : патент України на корисну модель № 147610 : МПК G01F 17/00/ С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С.О. Заклінський, Є. В. Цегельник, В. В. Комбаров. – № u202007627 ; заявл. 30.11.2020 ; опубл. 26.05.2021, Бюл. № 21. – 5 с. – Режим доступу: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITI

AL_FORMS=1&form-AX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=147610&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

21. Спосіб визначення об'єму посудини : патент України на корисну модель № 147597 : МПК G01F 17/00 / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С.О. Заклінський, Є. В. Цегельник, В. В. Комбаров. – № u202006623 ; заявл. 15.10.2020 ; опубл. 26.05.2021, Бюл. № 21. – 4 с. – Режим доступу: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=147597&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

22. Спосіб приготування газової суміші заданого складу : патент України на корисну модель № 146262 : МПК B01F 3/00 / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С.О. Заклінський, Є. В. Цегельник, В. В. Комбаров, Г. С. Тевзадзе, В. О. Гарін. – № u202005803 ; заявл. 10.09.2020 ; опубл. 03.02.2021, Бюл. № 5. – 4 с. – Режим доступу: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=146262&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

ДОДАТОК Б

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної
роботи Національного аерокосмічного
університету ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Андрій ГУМЕННИЙ
« 18 » _____ 2024

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Заклінського Сергія Олександровича «Удосконалення методу критичних
отворів для генерації газових сумішей у процесах фізико-технічної обробки» в
навчальному процесі кафедри технології виробництва літальних апаратів
Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Комісія у складі начальниці навчально-аналітичного відділу Барздун О. В.,
декана факультету літакобудування к.т.н., доцента Крицького Д. М., завідувачки
кафедри технології виробництва літальних апаратів, к.т.н., доцента
Мойорової К. В., склала цей акт про впровадження результатів кандидатської
дисертації Заклінського С. О. в навчальний процес кафедри технології
виробництва літальних апаратів при викладанні дисциплін: «Основи
модельовання технологічних процесів» для здобувачів вищої освіти першого
(бакалаврського) рівня освіти, «Устаткування і оснащення авіавиробництва» для
здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня освіти за ОПП
«Проектування, виробництво та сертифікація літальних апаратів».

Начальниця навчально-аналітичного
відділу



Олена БАРЗДУН

Декан факультету літакобудування



Дмитро КРИЦЬКИЙ

Завідувачка кафедри технології
виробництва літальних апаратів



Катерина МАЙОРОВА

Товариство з обмеженою відповідальністю
“Науково-виробниче підприємство Пластар”
Код ЄДРПОУ 31800623
Україна, 62203, Харківська обл., смт. Золочів, пров. Разіна, 8
Тел. +380506361192

вих. № 24-01/1-24 від 24 січня 2023

АКТ

впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи
старшого викладача кафедри технології виробництва літальних апаратів
Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут» Заклінського Сергія Олександровича
«Удосконалення методу критичних отворів для генерації газових сумішей у
процесах фізико-технічної обробки»

Цим підтверджуємо, що розробки та результати дисертаційної роботи Заклінського Сергія Олександровича були використані при виконанні міжнародного науково-технічного проекту по створенню склопластикового гелієвого кріостату для багатоканального магнітного енцефалографа. Розробка проводилася на замовлення фірми ConverTech, м. Сеул, Республіка Корея.

ТОВ «НВП Пластар» вже понад 30 років займається розробками та виробництвом виробів з композиційних пластиків, армованих скловолокном чи іншими наповнювачами. Досвід, набутий у виготовленні трубопровідної склопластикової продукції, дозволив залучити колектив підприємства до розробки вакуумно-щільних ємностей кріогенного призначення.

Створена Заклінським С.О. методика вимірювання об'єму складних форм посудин була впроваджена при виготовленні кріостата. Загальна конструкція кріостату передбачає наявність зовнішньої та внутрішньої ємності, та розміщення в герметизованому проміжку між ними екранно-вакуумної багаточислової теплової ізоляції. У внутрішньому баку розташовуються у кріогенній рідині надчутливі детектори магнітного поля, що повинні вимірювати нейронну активність головного мозку людини. У технічному завданні на розробку кріостата зазначено об'єм баку для рідкого гелію 73 л, прохідний діаметр горловини 400 мм, зовнішні габаритні розміри – висота 1350 мм, діаметр 600 мм. Для мінімізації стрибків механічної напруги на клейових з'єднаннях кожна донна частина має спряжену поверхню з відповідною циліндровою оболонкою, а в області розміщення детекторів обидві донні частини виконано у вигляді еквідистантних поверхонь. Така форма донних частин значно ускладнює визначення об'єму як внутрішнього баку так і вакуумованого простору між двома оболонками.

Також розроблена методика дозволила провести випробування механічної міцності всієї конструкції та окремих зовнішньої та внутрішньої ємностей. При цьому було визначено збільшення об'єму баків завдяки вигину донних формованих частин та з'ясовано їх ступінь деформації. Це дало змогу оцінити пружньо-деформований стан композитного склопластикового матеріалу та

визначити ступінь міцності посудин. Такий показник дуже важливий для ємностей, що працюють при криогенних температурах та мають небезпеку для пацієнтів та обслуговуючого персоналу.

Вважаємо, що впровадження даної методики у комплексі проведених робіт надасть змоги подальшого вдосконалення склопластикових кріостатів для МЕТ і забезпечить робочі характеристики таких кріостатів на рівні кращих зразків провідних світових виробників.

Директор ТОВ «НВП Пластар»
к.т.н.

О. Б. Ківіренко

Головний інженер
ТОВ «НВП Пластар»

О. Б. Шопен



ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник головного інженера з
організаційно-технічних й
експериментальних питань

ДП «КБ «Південне»

Павло ДЕГТЯРЕНКО
«_____» _____ 2024

АКТ

використання результатів кандидатської дисертаційної роботи
Заклінського Сергія Олександровича
«Удосконалення методу критичних отворів для генерації газових сумішей у
процесах фізико-технічної обробки»

Цей акт укладено комісією в такому складі.

Голова комісії:

Начальник випробувального комплексу

Сергій КОЛЕСНИЧЕНКО

Члени комісії:

В.о. начальника випробувального відділу

Дмитро МАРЧЕНКО

Начальник конструкторського відділу

Андрій КОВАЛЕНКО

Начальник групи технологічного сектору

Денис ІВЧЕНКО

Цей акт складено в тому, що результати наукових досліджень, які висвітлені в дисертаційній роботі Заклінського С. О. «Удосконалення методу критичних отворів для генерації газових сумішей у процесах фізико-технічної обробки», були використані при вимірюванні об'єму ємностей, які застосовуються під час проведення випробувань зразків техніки, що розробляється на державному підприємстві «Конструкторське бюро „Південне“ ім. М. К. Янгеля».

Проведено вимірювання об'єму балону, заводський №434, який за паспортом становить 0.08м^3 , що експлуатується при внутрішньому тиску до 20МПа. У результаті застосування запропонованої методики з використанням стисненого азоту визначено об'єм досліджуваного балону як 0.0799м^3 , що відповідає відхиленню від даних за паспортом на 0.125%.

Реалізація рекомендацій щодо використання методу для швидкісного вимірювання об'єму посудини складної форми дозволяє скоротити час вимірювання. Точність запропонованого методу дозволяє визначити ступінь збільшення об'єму через надлишковий тиск усередині тонкостінних ємностей.

Голова комісії:



Сергій КОЛЕСНИЧЕНКО

Члени комісії:



Дмитро МАРЧЕНКО



Андрій КОВАЛЕНКО



Денис ІВЧЕНКО