

УДК 532.529:519.872.8

doi: 10.32620/aktt.2021.4.09

О. В. ШИПУЛЬ, С. О. ЗАКЛІНСЬКИЙ, В. В. КОМБАРОВ,
О. А. ПАВЛЕНКО, В. О. ГАРІН

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна

ЧИСЛОВЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПОВНЕННЯ РЕЗЕРВУАРУ КОМПОНЕНТОМ ГАЗОВОЇ СУМІШІ

Предметом дослідження є математичні моделі газодинамічного нестационарного процесу наповнення резервуару компонентом газової суміші. *Метою* роботи є науково-експериментальне обґрунтування вибору моделі наповнення резервуару компонентом газової суміші із заданою точністю. *Завдання дослідження* полягають у проведенні натурних експериментів наповнення резервуару газом для подальшої верифікації системи керування генерацією газової суміші, а також створенні адекватних математичних моделей газодинамічної течії, аналізу результатів моделювання й використання верифікованих результатів у системі автоматизованої генерації газової суміші заданої точності за оцінюванням маси її компонентів залежно від параметрів наповнення. Поставлені завдання розв'язуються шляхом дослідження результатів числового моделювання процесу й натурних експериментів. Отримано такі **результати**. Проведено серію натурних експериментів з наповнення резервуару з високочастотним моніторингом тиску й температури наповнюваного газу. Проаналізовано значущі фактори, обґрунтовано використання SAS SST моделі турбулентності й побудовано моделі газодинамічного нестационарного процесу наповнення резервуару компонентом газової суміші для різних значень масової витрати. Моделювання здійснено з використанням програмного забезпечення ANSYS CFX. 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 компоненту суміші. Встановлено, що відхилення розрахункових даних під час використання моделі з адіабатичною умовою на стінці й моделі з умовою постійної температури складає: для тиску – не більше 5 %, для осередненої температури – 6 %, для температури в контрольній точці – 9 %, для маси – 1,5 %. Неспівпадіння результатів моделювання й натурального експерименту не перевищує 12 % за тиском і температурою в контрольній точці, а також 4 % за масою компоненту. Відповідно до визначеного в досліджуваних процесах параметру точності газової суміші, зокрема маси компоненту суміші, за результатами порівняння даних натурних експериментів і моделювання числові моделі скориговано до збігу за значенням маси не більше 0,5 %.

Ключові слова: математична модель газодинамічного процесу; параметри наповнення резервуару; числове моделювання; точність газової суміші.

Вступ

Високотехнологічні підприємства відповідно до стратегії Industry 4.0 будуються на повністю автоматизованих виробничих комплексах, які входять до складу кіберфізичних систем [1, 2]. Тому найсучасніші вимоги до технологій оброблення деталей, поряд з гнучкістю, продуктивністю, автоматизацією, включають цифровізацію процесів. Саме побудова цифрових близнюків процесів гарантує швидке переналагодження системи під конкретні завдання з автоматичним визначенням оптимального режиму для досягнення передбаченої точності оброблення [3].

Стосовно технологій термоімпульсного фінішного оброблення, побудова зазначених цифрових близнюків потребує комплексної моделі всіх робо-

чих процесів обладнання, у тому числі газодинамічних процесів наповнення робочої камери газовою сумішшю, що і є метою цього дослідження. Вимоги до точності дозування компонент паливної суміші для прецизійного термоімпульсного оброблення наведено в роботах [4]. Доведено, що з огляду на кваліметричні показники крайок прецизійних деталей припустимий діапазон похибки компонентного складу паливної суміші не має перевищувати 0,1...0,5 %. Крім цього, у роботі [5] показано, що для забезпечення стабільного значення питомого теплового потоку під час циклічного термоімпульсного оброблення потрібен одночасний контроль маси заряду та тиску в камері під час генерації суміші й наповнення з подальшою корекцією часу обробки за визначеною початковою температурою паливної суміші. У роботі [6] запропоновано дина-

мічний метод генерації сумішей газів, який базується на ефекті надкритичного витікання газів із ємностей через калібровані отвори, який забезпечує високу точність заданого складу суміші.

Сучасні світові дослідження газодинамічного наповнення посудин здебільшого проводяться на прикладі водню і визначають критичні значення таких параметрів: температури газу, термічних напружень у стінках посудин тощо [7–11]. Крім того, у згаданих роботах і роботах [12–14] час наповнення посудин газом складає декілька хвилин, на відміну від процесу, що досліджується. Різниця полягає, по-перше, у його швидкоплинності (приблизно 2 секунди), а по-друге, у необхідності високочастотного моніторингу тиску й температури в динаміці, як керуючих параметрів наповнення газу.

Для відпрацювання автоматизованої системи генерації паливної суміші в динаміці і подальшого створення її цифрового близнюка завданням цього дослідження є проведення серії експериментальних випробувань із наповнення резервуару газом і створення адекватної математичної моделі процесу.

Експериментальне дослідження наповнення резервуару компонентом газової суміші

Експериментальне дослідження проводилося на розробленому генераторі газової суміші автоматизованого термоімпульсного комплексу [15], зокрема, використаний вузол наповнення проміжного резервуару одним компонентом газової суміші, а саме азотом. Схема експериментального вузла генератора суміші, у який входить: лінія подачі компонента до генератора, магістраль подачі газу в резервуар із виконавчим клапаном показана на рис. 1. До резервуару під'єднані сенсор температури (термопара) та сенсор тиску (тип TSZ-6002). Реєстрація показань сенсорів температури та тиску 8 частотою 1 КГц та управління клапаном 6 здійснювалось із використанням системи ЧПК.

Для видалення залишків інших газів із порожнини резервуару й гарантованої присутності в ньому лише досліджуваного газу азоту проводилося попереднє п'ятиразове продування системи [16].

Натурні експерименти проведено із початковими умовами, що вказані в таблиці 1, і за таким алгоритмом:

1. Запуск реєстрації показань та сигналів управління на системі ЧПК.
2. Встановлення початкового тиску наповнення через редуктор 2.
3. Відкриття крану 3.
4. Встановлення часу наповнення резервуару –

відкриття клапану 6 через інтерфейс системи ЧПК.

5. Наповнення резервуару газом.

6. Завершення наповнення резервуару газом за вказаним часом – закриття клапану 6 через систему ЧПК.

7. Закриття крану 3.

8. Продовження реєстрації даних упродовж 40 секунд із метою вирівнювання температури газу в резервуарі.

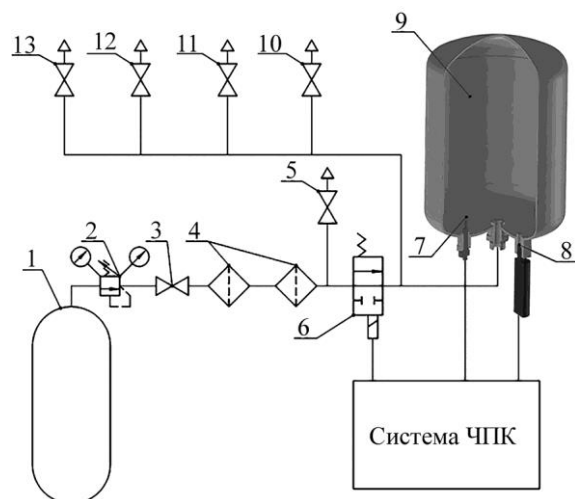


Рис. 1. Схема експериментальної установки:
1 – балон високого тиску; 2 – редуктор;
3, 5, 10, 11, 12, 13 – крани; 4 – фільтри;
6 – електроклапан Burkert; 7 – сенсор температури (термопара); 8 – сенсор тиску типу TSZ-6002;
9 – резервуар

Таблиця 1
Початкові умови експериментів

Параметр	№ експерименту	
	1	2
Початковий тиск у резервуарі, Па	476569,32	455444,58
Тиск через редуктор, атм	11	11
Середня витрата через редуктор, г/с	15,6	12,4
Температура в резервуарі, К	289,21	288,78
Об'єм резервуару, м ³	0,009605	0,009605
Проміжний об'єм, м ³	0,002	0,002
Початкова маса компоненту у резервуарі (азот), г	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	

Реєстрація експериментальних даних упродовж 40 секунд після завершення наповнення проводилася з метою зменшення похибки визначення кінцевої маси й середньої витрати через значне відхилення поточної температури від середньої в резервуарі.

Поточна маса газу визначалася за рівнянням:

$$m(t) = \frac{P(t)VM}{RT(t)}, \quad (1)$$

де t – час, с;

$P(t)$ – поточний тиск, Па;

V – об'єм резервуару, м³;

M – молярна маса газу, г/моль;

R – газова постійна, Дж/(моль × К);

$T(t)$ – поточна температура, К.

Моделювання процесу наповнення резервуару газом

Числове моделювання процесу наповнення резервуару компонентом газової суміші виконано за методом скінчених елементів із метою визначення параметрів тиску, температури й маси компоненту газу.

Геометрія моделі і її дискретизація. Для суттєвого скорочення потрібних розрахункових ресурсів реальна геометрична модель була спрощена заміною трубопровідної магістралі на проміжні ємності за умови збереження їх об'ємів. Отже, розрахункова модель являє собою внутрішню порожнину ділянки генератора газової суміші (рис. 2), що складається з двох газових домейнів зі спільним інтерфейсом – границею областей високого й низького тиску відповідно до реальної схеми встановлення перепускного клапану. Геометрія внутрішньої порожнини досліджуваного резервуару ідентична реальному. У місцях встановлення сенсорів тиску й температури розташовані відповідні точки моніторингу.

Моделювання наповнення резервуару однокомпонентним газом азотом здійснено моделлю ідеального газу. Розрахункову модель розбито на 1671 тис. скінчених елементів із максимальним лінійним розміром 3 мм (рис. 3), що забезпечує значення числа Куранта $C < 5$.

Для розв'язання визначальних рівнянь моделі використано метод скінчених об'ємів [17], за яким значення фізичних змінних розраховувалися (і зберігалися) лише в центрах скінчених елементів, а на гранях цих елементів розраховувалися потоки маси, імпульсу та енергії. Водночас просторові похідні апроксимувалися з використанням неявних різнице-вих операторів другого порядку точності. У присті-

нковій області створено п'ять шарів скінчених елементів для коректного відображення турбулентного спектру.

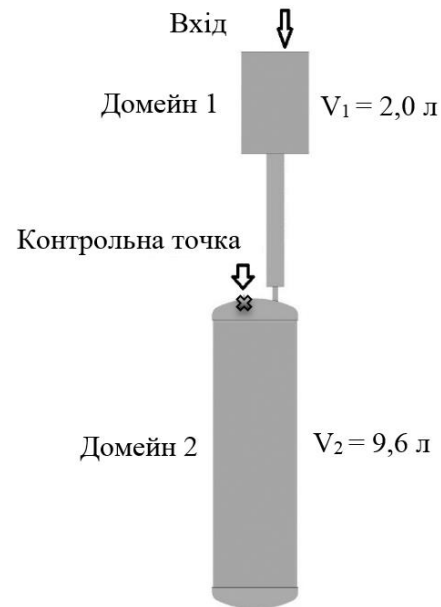


Рис. 2. Геометрична модель, що еквівалентна реальному експериментальному стенду

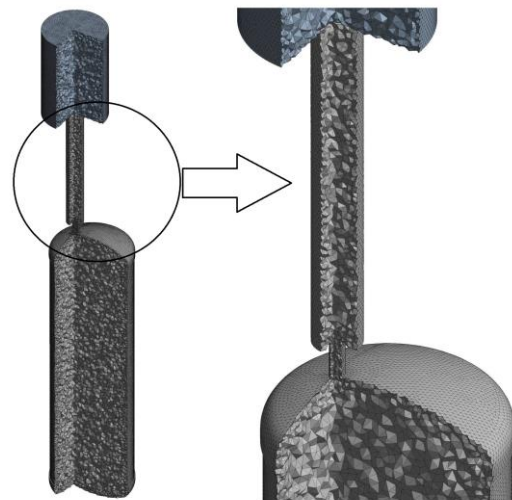


Рис. 3. Скінчено-елементна розрахункова модель експериментального стенду

Граничні й початкові умови. Відповідно до натурального експерименту в розрахунковій моделі визначено вхід, де задані умови постійної витрати за часом наповнення, напрямок потоку – по нормалі до входу, режим потоку – дозвуковий, теплообмін – статична температура (див. рис. 2). Цей тип початкових умов є найбільш сталим під час розв'язання рівнянь нестационарної течії. Але, розуміючи відхилення від реальних умов роботи редуктора, умова постійності витрати є часткою припущення й буде врахована під час аналізу результатів. Значення

витрати для кожної серії натурних експериментів розраховувалися як відношення додатку маси газу до часу наповнення (див. табл. 1).

Моделювання теплообміну між газом і стінкою є дуже важливою параметризацією моделі наповнення, але розрахунок цього процесу критично збільшує вимоги до ресурсів вирішувача, тому його не включено до рамок цього дослідження. Але натовість створено розрахункові моделі для двох типів граничних умов теплообміну: 1) теплообмін відсутній – адиабатична стінка (АС) і 2) стінка резервуару має постійну температуру (ПТС). Це дало змогу визначити вплив зазначених умов у кількісному вираженні похибки розрахунку маси компоненти в резервуарі.

Визначальні рівняння. Завдання наповнення резервуару описується такою системою рівнянь, що включає закони збереження маси (рівняння нерозривності), імпульсу (рівняння Нав'є-Стокса) й енергії нестационарної просторової течії за підходом Ейлера в Декартовій системі координат (x_i , $i = 1, 2, 3$) [18]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_i (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i \right) + \\ &= \frac{\partial P}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \epsilon, \end{aligned} \quad (4)$$

де u_i – компоненти вектору швидкості, [м/с];

$\rho = \frac{P}{RT}$ – густина газу (для 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 визначається наступним рівнянням:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right), \quad (4)$$

де $\mu = \mu_1 + \mu_t$ – коефіцієнти в'язкості;

μ_t – коефіцієнт турбулентної в'язкості;

μ_1 – коефіцієнт молекулярної в'язкості;

δ_{ij} – дельта-функція Кронекера (якщо $i = j$,

то $\delta_{ij} = 1$; якщо $i \neq j$, то $\delta_{ij} = 0$);

k – кінетична енергія турбулентності, [Дж].

Тензор напружень Рейнольдса в наближенні Буссінеска:

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}. \quad (5)$$

Для визначення коефіцієнта турбулентної в'язкості μ_t в цій роботі використані рівняння SAS SST-моделі турбулентності, яка показує високу точність при моделюванні пристінкових течій [19]:

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)}, \quad (6)$$

де $F_2 = \tanh(\arg_2^2)$;

$$\arg_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{0,09 \omega y}; \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) - \text{функція, яка до-}$$

рівнює одиниці для пристінковому шару і нулю для вільних шарів;

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

Для визначення кінетичної енергії і її дисипації використані рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) &= \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu_1 + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \omega) &= \frac{\gamma \rho}{\mu_t} \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu_1 + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + \\ &+ 2\rho(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{aligned} \quad (8)$$

де $\beta, \beta^*, \sigma_k, \sigma_\omega$ – емпіричні константи;

F_1 – функція, яка відіграє роль перемикача між моделями, так, що поблизу стінки вона дорівнює одиниці, а на віддалі від стінки – нулю.

Питомий тепловий потік визначається рівнянням:

$$q_k = - \left(\frac{\mu_1}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) c_p \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad (9)$$

де $\sigma_c = 0,9$ – емпірична константа;

Pr – число Прандтля;

c_p – питома теплоємність при постійному тиску, [Дж/(Кг×К)].

Налаштування вирішувача. Крок розв'язання рівнянь за часом встановлено адаптивний за числом Куранта ($C < 5$). Схема за часом – Second Order Backward Euler. Інші – High Resolution.

Для визначення залежностей розрахункових параметрів процесу за часом використана мова СЕЛ. Так, маса компоненту газу в розрахунковий момент часу в об'ємі резервуару визначалася інтегруванням значення густини газу:

$$m(t) = \text{volumeInt}(\rho(t)) @ \text{Volume}. \quad (10)$$

Аналіз отриманих результатів

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

Порівняння числових моделей між собою та з експериментом. На рис. 4 й 5 наведено графіки змінення температури в резервуарі за даними експериментів № 1 і № 2 (див. табл. 1) відповідно, а також результати розрахунків за моделями із двома типами граничних умов (адіабатична стінка (АС) і стінка з постійною температурою (ПТС)). Аналіз результатів виявляє таке. По-перше, значення осередненої за об'ємом температури значно відрізняється від температури в контрольній точці. На рис. 6 наведено поле температури і вектори швидкості в проміжній стадії наповнення. Безсумнівно, що розрахована в експерименті маса газу за температурою в точці матиме певну похибку.

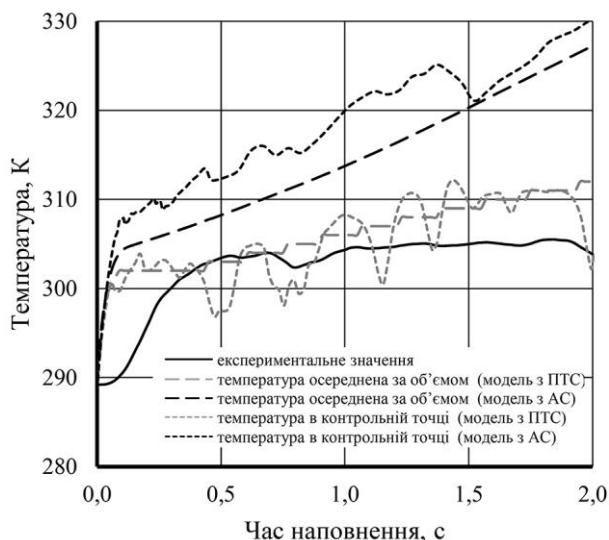


Рис. 4. Залежності температури газу в резервуарі під час наповнення витратою $G=15,6$ г/с.

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

Найближчими до експериментальних є значення температури в контрольній точці за умови пос-

тійної температури на стінці. У цьому випадку різниця результатів моделювання й експерименту складає 4 % для витрати 15,6 г/с і 6 % для витрати 12,4 г/с.

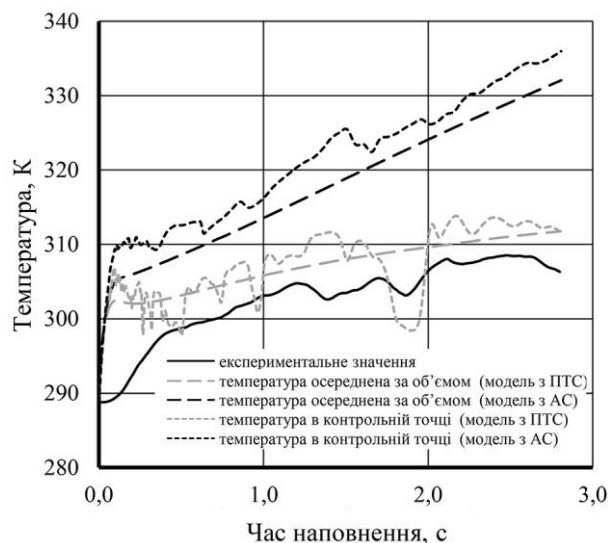


Рис. 5. Залежності температури газу в резервуарі під час наповнення витратою $G=12,4$ г/с.

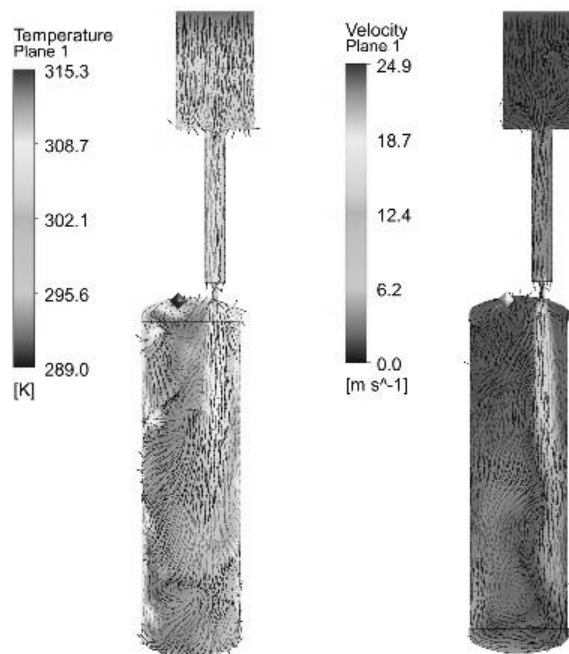


Рис. 6. Поле температури і швидкості на проміжних стадіях наповнення

На рис. 7 й 8 наведено графіки змінення тиску в резервуарі за даними експериментів № 1 і № 2 (див. табл. 1) відповідно, а також результати розрахунків моделей із двома типами граничних умов.

Порівняння графіків змінення тиску для моделей із різними умовами теплообміну на стінці встановлює різницю між значеннями 4 % для витрати 15,6 г/с і 5 % для витрати 12,4 г/с. При чому, зна-

чення тиску при адіабатичній стінці вище ніж за умови постійної температури, що обумовлено відсутністю теплообміну і, як слідство, додатковим підвищенням тиску через нагрівання газу в резервуарі.

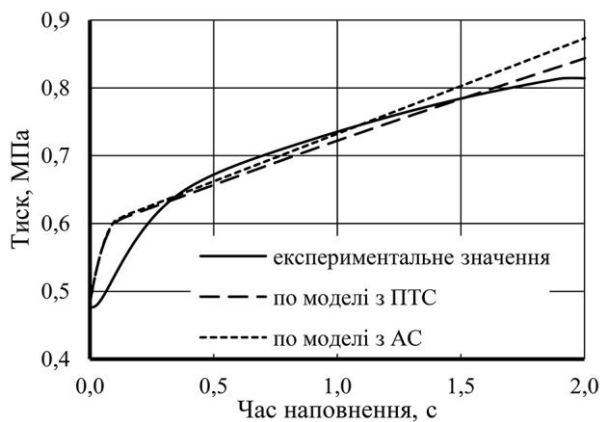


Рис. 7. Змінення тиску в резервуарі під час наповнення витратою $G=15,6$ г/с

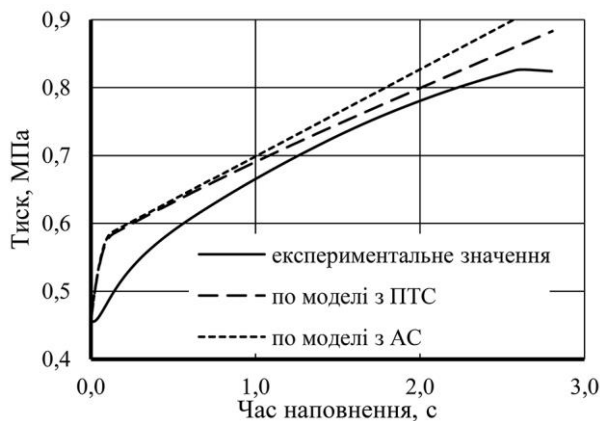


Рис. 8. Змінення тиску в резервуарі під час наповнення витратою $G=12,4$ г/с

Достатньо великий розбіг розрахункових і експериментальних значень тиску, 12 %, можна пояснити зазначеним вище припущенням про постійну витрату газу через вхід.

Аналогічно отримано графіки зміни маси газу в резервуарі для витрати 15,6 г/с (рис. 9) й 12,4 г/с (рис. 10). Незважаючи на вище вказаний розбіг значень тиску й температури, похибка розрахунку маси не перевищує 4 %.

Кореляція числових моделей з експериментом. Через те, що від точності дозування компонента газу залежить енергоозброєність термоімпульсного обладнання, маса газу є найголовнішим параметром, що контролюється в досліджуваному процесі. Тому, остаточний висновок за проведеним аналізом вимагає коригування розрахункових моделей у частині початкових умов. Звісно, що найближчим до реальності має бути задавання витрати відповідно

до витратної характеристики редуктора, але за її відсутності пропонується скоригувати значення витрат пропорційно до отриманих різниць за масою. Отже, маємо скориговані значення середньої витрати (табл. 2).

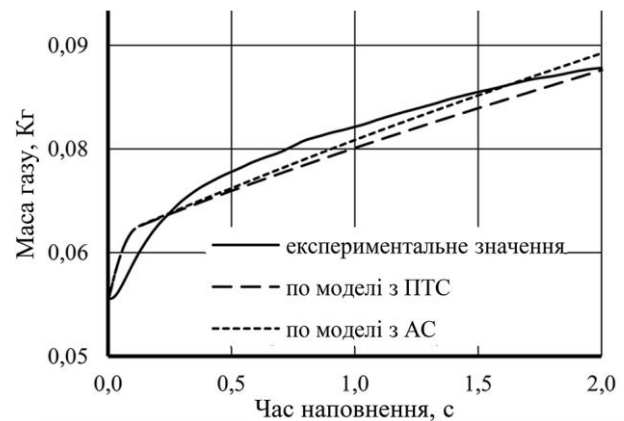


Рис. 9. Змінення маси газу в резервуарі під час наповнення витратою $G=15,6$ г/с

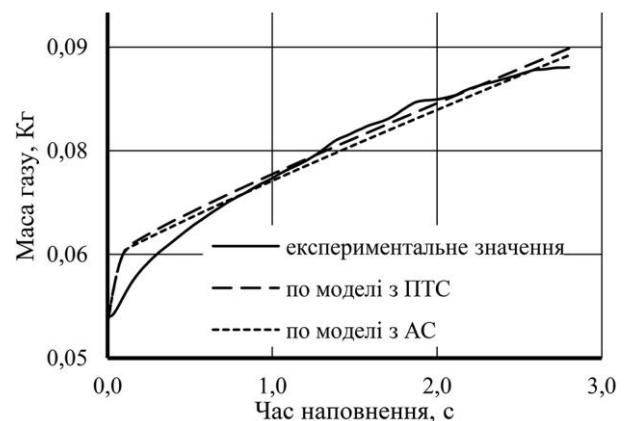


Рис. 10. Змінення маси газу в резервуарі під час наповнення витратою $G=12,4$ г/с

Таблиця 2
Скориговані початкові умови моделювання

Параметр	№ експерименту	
	1	2
Середня витрата через редуктор, г/с	13,62	11,29

На рис. 11, 12 наведено графіки залежностей маси для відповідних масових витрат, що отримані за скоригованими розрахунковими моделями.

Остаточо, відхилення результатів моделювання й експериментального визначення маси газу в резервуарі складає 0,5 %.

Висновки

Проведено серію натурних експериментів з наповнення резервуару з високочастотним моніторин-

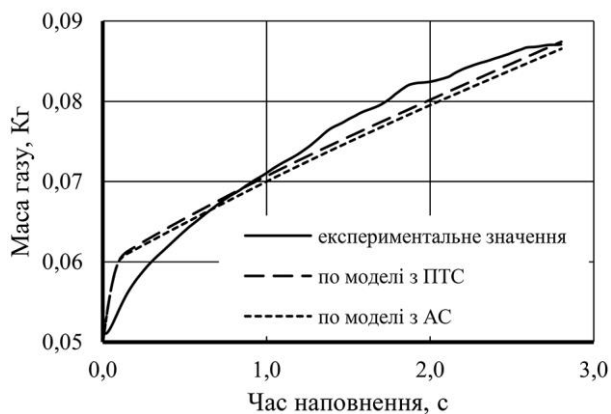


Рис. 11. Змінення маси газу в резервуарі під час наповнення витратою $G=13,62$ г/с

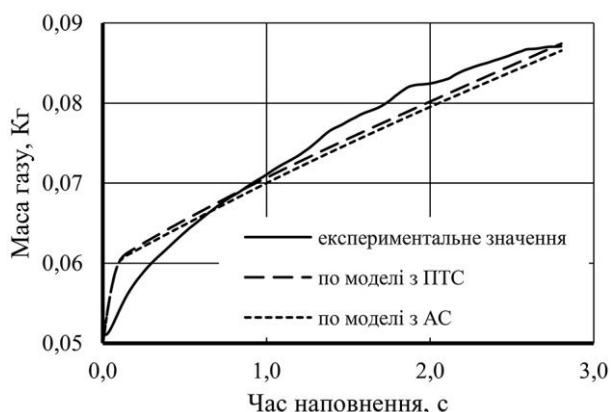


Рис. 12. Змінення маси газу в резервуарі під час наповнення витратою $G=11,29$ г/с.

гом тиску й температури наповнюваного газу. Проаналізовано значущі фактори, обґрунтовано використання SAS SST моделі турбулентності й побудовано моделі газодинамічного нестационарного процесу наповнення резервуару компонентом газової суміші для різних значень масової витрати. Моделювання здійснено з використанням програмного забезпечення ANSYS CFX. 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 компоненту суміші. Встановлено, що відхилення розрахункових даних під час використання моделі з адіабатичною умовою на стінці й моделі з умовою постійної температури складає: для тиску – не більше 5%, для осередненої температури – 6%, для температури в контрольній точці – 9%, для маси – 1,5%. Неспівпадіння результатів моделювання й натурального експерименту не перевищує 12% за тиском і температурою в контрольній точці, а також 4% за масою компоненту. Відповідно до визначеного в досліджуваних процесах параметру точності газової суміші, зокрема маси компоненту суміші, за результатами порівняння даних натурних

експериментів і моделювання числові моделі скориговано до збігу за значенням маси не більше 0,5%.

Література

- Xu, L. D. Industry 4.0: state of the art and future trends [Text] / L. D. Xu, E. L. Xu, L. Li // *International Journal of Production Research*. – 2018. – Vol. 56, iss. 8. – P. 2941-2962. DOI: 10.1080/00207543.2018.1444806.
- Mubarak, M. F. Industry 4.0 technologies, digital trust and technological orientation: What matters in open innovation? [Text] / M. F. Mubarak, M. Petraite // *Technological Forecasting and Social Change*. – 2020. – Vol. 161. – Article 120332. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120332.
- Advanced thermal energy method for finishing precision parts / Sergiy Plankovskyy, Viktor Popov, Olga Shypul, Yevgen Tsegelnyk, Oleg Tryfonov, Dmytro Brega *Advanced Machining and Finishing Handbooks in Advanced Manufacturing 2021, Chapter 15*. – P. 527-575. DOI: 10.1016/C2018-0-00908-1.
- Планковский, С. И. Перспективы применения современных методов генерации газовых смесей для прецизионной термоимпульсной обработки [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, С. А. Заклинский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2017. – № 3 (138). – С. 85–93.
- Алгоритм управления системой генерации смеси для прецизионной термоимпульсной обработки [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, С. А. Заклинский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2018. – № 5 (149). – С. 58–66. DOI: 10.32620/akt.2018.5.09.
- Dynamic method of gas mixtures creation for plasma technologies [Text] / S. I. Plankovskyy, O. V. Shypul, S. A. Zaklinskyu, O. V. Tryfonov // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2018. – Vol. 6 (188). – P. 189–193.
- Evaluating the temperature inside a tank during a filling with highly-pressurized gas [Text] / T. Bourgeois, F. Ammouri, M. Weber, C. Knapik // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2015. – Vol. 40, iss. 35. – P. 11748-11755. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.096.
- Elgin III, R.C. A semiempirical compressed-natural gas tank-filling model created for a novel self-refueling vehicle system [Text] / R. C. Elgin III, C. L. Hagen // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. – 2016. – Vol. 230, iss. 12. – P. 1719–1726. DOI: 10.1177/0954407015623409.
- Thermodynamic real gas analysis of a tank filling process [Text] / M. Striednig, S. Brandstatter, M. Sartory, M. Klell // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – Vol. 39, iss. 16. – P. 8495-8509. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.028.
- Study on the Prediction of the Temperature and Mass of Hydrogen Gas inside a Tank during Fast Fill-

ing Process [Text] / J. Li, N. Myoung, J. Kwon, S. Jang, T. Lee // *Energies*. – 2020. – Vol. 13, iss. 23. – Article 6428. DOI: 10.3390/en13236428.

11. The temperature evolution in compressed gas filling processes: A review [Text] / T. Bourgeois, F. Ammouri, D. Baraldi, P. Moretto // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2018. – Vol. 43, iss. 4. – P. 2268-2292. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.068.

12. Heitsch, M. Numerical investigations on the fast filling of hydrogen tanks [Text] / M. Heitsch, D. Baraldi, P. Moretto // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2011. – Vol. 36, iss. 3. – P. 2606-2612. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.04.134.

13. Suryan, A. Three dimensional numerical computations on the fast filling of a hydrogen tank under different conditions [Text] / A. Suryan, Heuy Dong Kim, T. Setoguchi // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2012. – Vol. 37, iss. 9. – P. 7600-7611. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.02.019.

14. Numerical study on the fast filling of on-bus gaseous hydrogen storage cylinder [Text] / J. Liu, S. Zheng, Z. Zhang, J. Zheng, Y. Zhao // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2020. – Vol. 45, iss. 15. – P. 9241-9251. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.033.

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

16. Сысоев, Ю. А. Создание смесей газов для ионно-плазменных технологий [Текст] / Ю. А. Сысоев, В. П. Руденко, А. В. Долманов // *Creating a mixture of gases for ion-plasma technologies*. - 2014. – Vol. 2, No. 5(68). – С. 15-19. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.21873.

17. ANSYS CFX Reference Guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=CFX&pid=CFX&lang=en. – 12.05.2021.

18. Menter, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [Text] / F. R. Menter // *AIAA*. – 1994. – Vol. 32, no. 8. – P. 269-289. DOI: 10.2514/3.12149.

19. Menter, F. R. A scale-adaptive simulation model for turbulent flow predictions [Text] / F. R. Menter, M. Kuntz, R. Bender // *AIAA*. – 2003. – Paper 2003-0767. – 40 p. DOI: 10.2514/6.2003-767.

References

1. Xu, L. D., Xu, E. L., Li, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 2018, vol. 56, iss. 8, pp. 2941-2962. DOI: 10.1080/00207543.2018.1444806.

2. Mubarak, M. F., Petraite, M. Industry 4.0 technologies, digital trust and technological orientation: What matters in open innovation? *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, vol. 161, Article 120332. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120332.

3. Plankovskyy, S., Popov, V., Shypul, O., Tsegelnyk, Ye., Tryfonov, O., Brega, D. Advanced thermal energy method for finishing precision parts : book. *Advanced Machining and Finishing Handbooks in Advanced Manufacturing 2021*, Chapter 15, pp. 527-575. ISBN 978-0-12-817452-4 DOI: 10.1016/C2018-0-00908-1.

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

5. Plankovskii, S. I., Shipul', O. V., Trifonov, O. V., Zaklinskii, S. A. Algoritm upravleniya sistemoi generatsii smesi dlya pretsizionnoi termoimpul'snoi obrabotki [Algorithm of mixture generation control system for precision thermal pulse treatment]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2018, vol. 5 (149), pp. 58–66. DOI: 10.32620/akt.2018.5.09.

6. Plankovskyy, S. I., Shypul, O. V., Zaklinskyy, S. A., Tryfonov, O. V. Dynamic method of gas mixtures creation for plasma technologies. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2018, vol. 6(188), pp. 189–193.

7. Bourgeois, T., Ammouri, F., Weber, M., Knapik, C. Evaluating the temperature inside a tank during a filling with highly-pressurized gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, vol. 40, iss. 35, pp. 11748-11755. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.096

8. Elgin III, R. C., Hagen, C. L. A semiempirical compressed-naturalgas tank-filling model created for a novel self-refueling vehicle system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2016, vol. 230, iss. 12, pp. 1719-1726. DOI: 10.1177/0954407015623409.

9. Striednig, M., Brandstatter, S., Sartory, M., Klell, M. Thermodynamic real gas analysis of a tank filling process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, iss. 16, pp. 8495-8509. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.028.

10. Li, J., Myoung, N., Kwon, J., Jang, S., Lee, T. Study on the Prediction of the Temperature and Mass of Hydrogen Gas inside a Tank during Fast Filling Process. *Energies*, 2020, vol. 13, iss. 23, Article 6428. DOI: 10.3390/en13236428.

11. Bourgeois, T., Ammouri, F., Baraldi, D., Moretto, P. The temperature evolution in compressed gas filling processes: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, iss. 4, pp. 2268-2292. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.068.

12. Heitsch, M., Baraldi, D., Moretto, P. Numerical investigations on the fast filling of hydrogen tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, vol. 36, iss. 3, pp. 2606-2612. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.04.134.

13. Suryan, A., Kim, Heuy Dong., Setoguchi, T. Three dimensional numerical computations on the fast filling of a hydrogen tank under different conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, vol. 37, iss. 9, pp. 7600-7611. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.02.019.

14. Liu, J., Zheng, S., Zhang, Z., Zheng, J., Zhao, Y. Numerical study on the fast filling of on-bus gaseous hydrogen storage cylinder. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, vol. 45, iss. 15, pp. 9241-9251. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.033.

15. Plankovskij S. I., Shipul'O. V. at al. *Rozroblennyya avtomatizovanogo kompleksu dlya precizijnogo termoimpul'snogo obroblennyya detonuvani'nimi gazovimi sumishami: naukovy materialy : monografiya* [Development of an automated complex for precision thermopulse treatment with detonating gas mixtures: scientific materials: monograph]. Kharkiv, Nac. aerokosm.

un-t im. M. Є. Zhukovskogo «Harkiv. aviac. in-t» Publ., 2020. 318 p.

16. Sysoev, Yu. A., Rudenko, V. P., Dolomanov, A. V. Sozdaniye smesey gazov dlja iono-plazmenih tehnologiy [Creating a mixture of gases for ion-plasma technologies]. *Vostochno-Evropejskiy jurnal peredovih tehnologiy – Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 2014, vol. 2, no. 5(68), pp. 15-19. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.21873.

17. ANSYS CFX Reference Guide. Available at: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=CFX&pid=CFX&lang=en. (accessed 12.05.2021).

18. Menter, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 269-289. DOI: 10.2514/3.12149.

19. 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.

Надійшла до редакції 25.05.2021, розглянута на редколегії 09.08.2021

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПОЛНЕНИЯ РЕЗЕРВУАРА КОМПОНЕНТОМ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

О. В. Шипуль, С. А. Заклинский, В. В. Комбаров,
А. А. Павленко, В. О. Гарин

Предметом исследования являются математические модели газодинамического нестационарного процесса наполнения резервуара компонентом газовой смеси. **Целью** работы является научно-экспериментальное обоснование выбора модели наполнения резервуара компонентом газовой смеси с заданной точностью. **Задачи исследования** заключаются в проведении натурных экспериментов по наполнению резервуара газом для дальнейшей верификации системы управления генерацией газовой смеси, а также в создании адекватных математических моделей газодинамического течения, анализа результатов моделирования и использования верифицированных результатов в системе автоматизированной генерации газовой смеси заданной точности по оценке массы ее компонентов в зависимости от параметров наполнения. Поставленные задачи решаются путем исследования результатов численного моделирования процесса и натурных экспериментов. Получены следующие **результаты**. Проведена серия натурных экспериментов наполнения резервуара с высокочастотным мониторингом давления и температуры наполняемого газа. Проанализированы значимые факторы, обосновано использование SAS SST модели турбулентности и построены модели газодинамического нестационарного процесса наполнения резервуара компонентом газовой смеси для различных значений массового расхода. Моделирование осуществлено с использованием программного обеспечения ANSYS CFX. Определено влияние учета теплообмена со стенками резервуара на исследуемые параметры смеси, а именно: давление, осредненную по объему температуру газа, температуру в контрольной точке, массу компонента смеси. Установлено, что отклонение расчетных данных при использовании модели с адиабатическим условием на стенке и модели с условием постоянной температуры составляет: для давления – не более 5 %, для осредненной температуры – 6 %, для температуры в контрольной точке – 9 %, для массы – 1,5 %. Несовпадение результатов моделирования и натурального эксперимента не превышает 12 % по давлению и температуре в контрольной точке, а также 4 % по массе компонента. В соответствии с определенным в исследуемых процессах параметром точности газовой смеси, в частности массы компонента смеси, по результатам сравнения данных натурных экспериментов и моделирования числовые модели скорректированы до совпадения по значению массы не более 0,5 %.

Ключевые слова: математическая модель газодинамического процесса; параметры наполнения резервуара; численное моделирование; точность газовой смеси.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF FILLING A VESSEL WITH A COMPONENT OF GAS MIXTURE

O. Shypul, S. Zaklinsky, V. Kombarov, A. Pavlenko, V. Garin

The subject of the research is mathematical models of a gas-dynamic non-stationary process of filling a vessel with a component of a gas mixture. **The aim** of the study is the scientific and experimental substantiation of the choice of a model of filling a vessel with a component of a gas mixture with a given accuracy. **The objectives** of the study are to conduct full-scale experiments on filling the vessel with gas for further verification of the gas mixture generation control system, as well as in the development of adequate mathematical models of gas-dynamic flow, the analysis of simulation results, and the use of verified results in the system of automated generation of a gas mixture of a given accuracy by assessing the mass of its components depending on the filling parameters. The tasks are solved by studying the results of numerical modeling of the process and full-scale experiments. **The following results** are obtained. A series of full-scale experiments on filling a vessel with high-frequency monitoring of the pressure and temperature of the gas being filled was carried out. Significant factors were analyzed. The use of SAS SST turbulence models was substantiated. Models of the gas-dynamic unsteady process of filling the vessel with a component of the gas mixture for various values of the mass flow rate had been built. All the simulations were carried out using the ANSYS CFX software package. The influence of considering a heat exchange with the vessel walls on the studied parameters of the mixture is determined, namely: pressure, gas temperature averaged over the volume, gas temperature in a control point, mass of the component of a gas mixture. It was found that the deviation of the calculated data when using a model with an adiabatic condition on the wall compared to a model with a constant temperature regime is: for pressure – no more than 5 %, for averaged temperature – 6 %, for the temperature at the monitor point – 9 %, for mass – 1.5 %. The discrepancy between the simulation results and the full-scale experiment does not exceed 12 % in pressure and temperature at the monitor point, as well as 4 % in the mass of the component. By the experimentally determined accuracy parameter of the gas mixture (the mass of the mixture component in particular), the numerical models had been corrected to provide the mass value error of no more than 0.5 %.

Keywords: the mathematical model of a gas-dynamic process; vessel filling parameters; numerical modeling; dosing accuracy; the components of the gas mixture.

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

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

Комбаров Володимир Вікторович – канд. техн. наук, старший викладач кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Павленко Олексій Анатолійович – канд. техн. наук, старший викладач кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Гарін Вадим Олегович – канд. техн. наук, старший науковий співробітник кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

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

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

Volodymyr Kombarov – PhD, Assistant Professor of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: vl.kombarov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6158-0374, Scopus Author ID: 57211793853.

Oleksiy Pavlenko – PhD, Assistant Professor of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: pavlenko.aleksey@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1628-2239, Scopus Author ID: 57220201408,
ResearcherID: AAE-6098-2019.

Vadim Garin – PhD, Senior Researcher of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: garin.vadim@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7788-0593, Scopus Author ID: 57219015898.