

УДК 533.27:004.94

doi: 10.32620/aktt.2022.5.03

В. О. ГАРИН<sup>1</sup>, Д. А. ТКАЧЕНКО<sup>1</sup>, О. В. ШИПУЛЬ<sup>1</sup>,  
С. О. ЗАКЛІНСЬКИЙ<sup>1</sup>, О. В. ТРИФОНОВ<sup>1</sup>, С. І. ПЛАНКОВСЬКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний університет міського господарства  
ім. О. М. Бекетова, Харків, Україна

## РОЗРОБКА ЦИФРОВОГО БЛИЗНЮКА НАПОВНЕННЯ РЕЗЕРВУАРУ ГАЗОВОЮ СУМІШШЮ

*Предметом* дослідження є цифровий близнюк процесу наповнення резервуару компонентами газової суміші. *Метою* роботи є обґрунтований вибір моделі цифрового близнюка процесу наповнення резервуару газовою сумішшю. *Завдання дослідження* полягає в аналізі методів побудови й режимів роботи цифрового близнюка, а також в підборі налаштувань моделі роботи цифрового близнюка, які забезпечують раціональне відтворення газодинамічного нестационарного процесу наповнення резервуару компонентом газової суміші. Отримано наступні **результати**. Відповідно до концепції цифровізації сучасного виробництва стосовно досліджуваної технології термоімпульсної обробки обґрунтовано необхідність побудови цифрових близнюків для притаманних окремих фізико-хімічних процесів. Визначені особливості роботи генератора паливної суміші за методом критичних отворів й наведені відповідні визначальні рівняння дозування компонент газавої суміші й часу наповнення резервуару для побудови системи керування з використанням цифрового близнюка процесу. Проаналізовано існуючі методи й засоби побудови цифрових близнюків аналогічних досліджуваній системі. Для подальшого використання в структурі цифрового близнюка відокремленої підсистеми наповнення резервуару одним з компонентів газової суміші побудовано скінчено-елементну модель газодинамічної нестационарної течії й проведено числове дослідження з використанням програмного забезпечення ANSYS Fluent. Визначені залежності від часу наповнення резервуару таких основних параметрів досліджуваного процесу як тиск, температура й заповнена маса газової суміші. Обґрунтовано доцільність й розроблена модель зниженого порядку (ROM модель ANSYS Fluent) та використана в ANSYS Twin Builder для побудови цифрового близнюка. Розроблені та проаналізовані приклади цифрових близнюків системи наповнення резервуару газовою сумішшю за допомогою стандартних елементів бібліотек Twin Builder та Modelica.

**Ключові слова:** цифровий близнюк; модель зниженого порядку; числове моделювання; термоімпульсна фінішна обробка.

### Вступ

Важливі показники якості прецизійних деталей і механізмів, такі як ресурс та надійність, здебільшого визначаються якістю обробки кромки і очищення поверхні. Незважаючи на досконалість технологій механічної обробки, утворення різноманітних забруднень деталей під час виробництва неминуче. У загальній трудомісткості виготовлення деталей значну частку займають технології фінішної обробки, зокрема зняття задирок, прецизійна обробка, очищення поверхонь, виготовлення типових рельєфів тощо [1–4]. Оздоблювальні операції продуктами згоряння паливної суміші, що здійснюються різними видами термоенергетичного метода, включаючи термоімпульсний, мають унікальні переваги за ефективністю та технологічними можливостями [5]. Втім нагальним питанням щодо впровадження вказаних техно-

логій є складність визначення, налаштування та забезпечення оптимальних режимів роботи обладнання задля досягнення передбаченої точності обробки [6].

Технологія термоімпульсної фінішної обробки відбувається за рахунок сукупності складних фізико-хімічних процесів, може здійснюватися різнорізними паливними сумішами за компонентним складом й гомогенності, за різними початковими умовами тиску й режимами згоряння, тощо. Багатофакторність цих процесів є основною перешкодою не тільки для визначення потрібних технологічних режимів, а й для прогнозування перебігу як самого процесу обробки, так і результату.

Засади щодо створення систем автоматизованого призначення режимів термоімпульсного обладнання наведено у монографії [7]. У той же час до сучасних підприємств відповідно до стратегії індустріальної революції Industry 4.0 [8, 9], поряд з гнучкістю, продуктивністю, автоматизацією, висувуються

вимоги щодо цифровізації виробничих процесів й побудови цифрових близнюків процесів (Digital Twin).

Цифровий близнюк створюється як віртуальна копія фізичного об'єкта для використання в якості симулятора, прогностичної моделі та / або інструменту діагностування й налаштування обладнання шляхом моніторингу в режимі реального часу. В управлінні технологічним процесом цифровий близнюк процесу дозволяє тестувати та перевіряти різні стратегії перебігу, при цьому продуктивність системи управління залежить від наявних датчиків та виконавчих механізмів цифрового близнюка [10].

Стосовно технології термоімпульсного оброблення, побудова цифрового близнюка процесу потребує використання комплексної моделі всіх робочих процесів обладнання, включаючи газодинамічні процеси генерації й наповнення робочої камери газовою сумішшю, підпалу й згоряння палива, теплообміну з оброблювальними об'єктами, випуску продуктів згоряння тощо. Вочевидь створення зазначеної комплексної моделі, більш того реалізація розрахунків на її основі, виявляється невикористовувано складним завданням. Тому раціональною є побудова цифрових близнюків окремих фізико-хімічних процесів, притаманних термоімпульсній обробці, й у подальшому загальна цифровізація всієї технології.

Типовий цикл розробки цифрового близнюка устаткування та подальше його використання для моделювання технологічного процесу розглянуто в роботах [11–18]. Загальною характеристикою цих робіт виступає єдність авторів в наданні власних додаткових значень у визначення та створення цифрових близнюків. Майже в кожній роботі автори зосереджують окрему увагу в наведенні власної структуризації процесу створення близнюка, це можна пояснити великою кількістю та різновидом систем для яких можуть бути творені цифрові близнюки. На думку авторів цієї роботи роботу [11] слід вважати методичним підручником по створенню цифрового близнюка. Автори роботи [11] наводять п'яти вимірну модель двійника, яка впорядковує усі етапи створення, впровадження в експлуатацію та контролю за роботою обладнання та перебігом даних. Більш спрощену схему створення цифрового двійнику надають автори робіт [12 – 14], в кожній із цих робіт підкреслюється важливість окремих сторін цифрового двійнику. В роботі [12] автори наполягають на важливості цифрової компоненти у створенні та впровадженні близнюка, від якої залежить швидкість керування процесом та обміну даними між елементами системи. В роботі [13] показана важливість зв'язку між цифровим близнюком та реальною системою, моніторингу їх роботи системи у режимі реального часу та обміну інформацією між ними. Більш незвичайну концепцію висунули в роботі [14], в якій

запропоновано враховувати еволюцію стану об'єкту при створенні близнюка. Також автори роботи [14] оголошують на особливості та актуальності створення двійників мультифізичних моделей, які мають опрацьовувати великі масиви різнорідних даних. Взагалі на цей час існує багато робіт, в яких наводиться глибоке теоретичне обґрунтування ідеї створення цифрового двійнику, його концепції, суті етапів створення та впровадження близнюка реальної системи або процесу тощо. Короткий перелік таких робіт наведено в оглядовій статті [15]. Та на кінець огляду праць, з якими ознайомились співавтори роботи, можна зазначити групу практично спрямованих робіт [16 – 18]. В роботі [16] автори довели важливість створення цифрового близнюка на етапі проектування великої складної системи. Вони прийшли до висновку, що попередній аналіз системи в цифровому вигляді допоможе уникнути багатьох коштовних проблем на етапі побудови реального устаткування та при його налагодженні. Таким висновком керувалися автори роботи [17] при створенні нового контролера вітрової турбіни. В своїй роботі вони застосували інтерфейс Face Mock-Up Interface (FMI) для поєднання моделей CFX та Maxwell 3D та використовували можливості програмного продукту Ansys Twin Builder при створенні цифрового двійнику. Зрештою, в роботі [18] наведено зразковий приклад поєднання в одну систему реального тормозного пристрою з його цифровим близнюком, обмін даними між якими відбувався в режимі реального часу.

Після ознайомлення з широким колом робіт визнаних науковців можна впевнено стверджувати, що основними заходами під час розробки моделі є визначення проблеми та моделювання цілі, збирання та аналізування даних з реальної системи, розробка і верифікація концепту моделі цифрового близнюка, що відображує реальну систему, впровадження цифрового близнюка у технологічний процес та порівняння його роботи з роботою реального обладнання.

В цьому дослідженні застосовано методологію цифрових близнюків до системи генерації паливної суміші комплексу термоімпульсного оброблення. Зокрема в рамках цієї роботи розглянуто підсистему наповнення резервуару газовою сумішшю з метою визначення й обґрунтування вибору моделі цифрового близнюка зазначеної системи.

### **Аналітико-числове дослідження підсистеми наповнення резервуару компонентом газової суміші**

Блоки подачі палива, окислювача й нейтрального газу генератора паливної суміші побудовані за однаковими схемами, тому для подальшого дослі-

дження без втрати спільності виділена одна підсистема, зокрема блок окислювача, для якого вирішується задача побудови цифрового близнюка процесу наповнення резервуару компонентом газової суміші.

Досліджувана підсистема (рис. 1) складається з блоків ресивера, змішувача, камери. Блок ресивера містить двоходовий електромагнітний клапан YA81 для наповнення компонентом ресивера (проміжний посуд) TANK82, датчика тиску BP82, датчика температури BK82. Блок змішувача складається із двоходового електромагнітного клапану YA83, зворотного клапану 83, змішувача MIXER100 з змінним соплом. Наповнювана камера CHAMBER60 (далі резервуар) обладнана сенсорами тиску BP61(1), BP61(2) і температури BK61(1), BK61(2). Система обладнана кранами 118, 116 для підключення або відключення інших блоків до генератора, кранами 114 та 115 для можливості від'єднання камери без заповітрявання устаткування та краном 117 для скидання газу з камери. Для забезпечення заданої точності паливної суміші за її компонентним співвідношенням й гомогенності робота цієї системи здійснюється за динамічним методом, який базується на ефекті надкритичного витікання газів із ресиверів через калібровані отвори у змішувачі [19, 20].

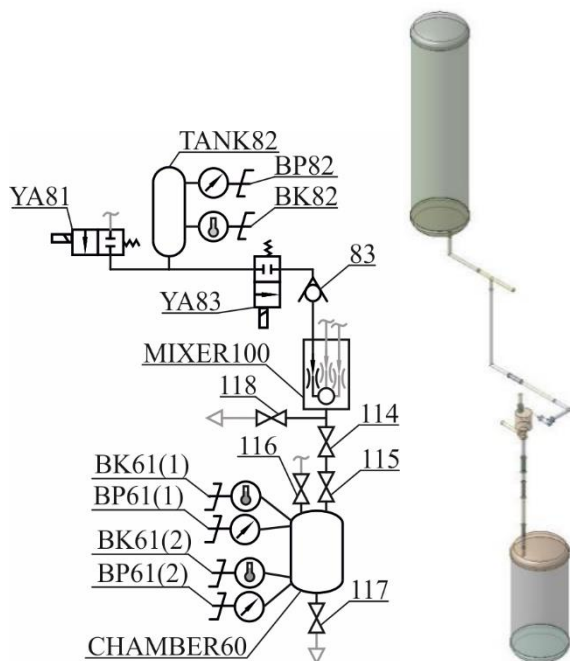


Рис. 1. Схема (ліворуч) й 3D (праворуч) модель блоку наповнення компонентом газової суміші

**Визначальні рівняння дозування компонент газовой суміші й часу наповнення резервуару сумішшю.** За наведеною в роботі [21] методикою миттєве значення масової витрати через критичний отвір при надкритичному перепаді тисків визначається виразом:

$$G = \frac{\mu F P}{\sqrt{RT}} \psi, \quad (1)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт витрати;

$F$  – площа поперечного перерізу критичного отвору;

$P$  – тиск в ресивері;

$T$  – температура в ресивері;

$R$  – газова стала компонента паливної суміші;

$$\psi = \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}};$$

$k$  – показник адиабати компонента паливної суміші.

Поточні значення температури в ресивері визначаються як:

$$T = T_0 \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (2)$$

де  $T_0, P_0$  – початкова температура й тиск в ресивері.

Поточні значення тиску в ресиверах визначаються як:

$$P = P_0 \left( 1 + Bt \right)^{\frac{-2k}{k-1}}, \quad (3)$$

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

$V$  – об'єм ресиверу.

Якщо співвідношення масових концентрацій компонентів суміші є заданим  $c_1/c_2 = \beta$ , то задаючи значення площі критичного отвору  $F_2$ , об'єму ресиверу  $V_2$  та початкового тиску  $P_{02}$  в ньому для одного з компонентів, наприклад окислювача, та за умови рівності  $P_1 = P_2 = P_{02}$ ,  $T_1 = T_2 = T_0$  у початковий момент часу з (1) отримаємо:

$$F_1 = \beta \cdot F_2 \frac{\mu_2 \sqrt{M_2} \psi_2}{\mu_1 \sqrt{M_1} \psi_1}, \quad (4)$$

де  $M_1, M_2$  – молярні маси газів, що утворюють суміш.

При вільному витіканні забезпечити рівність тисків і температур в ресиверах не вдасться за рахунок різних показників адиабати газів складових суміші (окиснювач – двоатомний газ, паливо – багатоатомний). Проте, підставляючи для обох компонент вирази (3) і (4) у формулу (2) для поточної температури отримаємо, що співвідношення  $T_1 = T_2$  дотримується тотожно за рівності початкових температур

$T_{10} = T_{20} = T_0$  і співвідношенні об'ємів ресиверів, що визначаються виразом:

$$V_1 = \beta \cdot V_2 \frac{\mu_2 M_2 k_1 - 1}{\mu_1 M_1 k_2 - 1}. \quad (5)$$

Ураховуючи факт, що тиск в ресиверах з газами і, відповідно, масові витрати компонент під час наповнення будуть змінюватися по-різному, досягнення заданої точності масової концентрації газів у суміші досягається за рахунок встановлення початкових тисків в ресиверах виходячи з виразу [21]:

$$\int_0^{\tau} G_1 dt \Big/ \int_0^{\tau} G_2 dt = \beta, \quad (6)$$

де  $G$  – масова витрата газу;

$\tau$  – час наповнення резервуару сумішшю.

Після підстановки виразів (1) (2), (3) в (6) маємо:

$$\frac{P_{01}}{P_{02}} = \frac{\int_0^{\tau} (1 + B_2 t)^{-\frac{k_2+1}{k_2-1}} dt}{\int_0^{\tau} (1 + B_1 t)^{-\frac{k_1+1}{k_1-1}} dt}. \quad (7)$$

Час наповнення резервуару сумішшю визначається як час, за який для одного з компонентів маса, подана в камеру, стає рівною заданою. Виходячи з прийнятих припущень, це призводить до наступної залежності для однієї з компонентів:

$$m_2 = \int_0^{\tau} G_2 dt, \quad (8)$$

яка, після інтегрування з урахуванням (1), (2), (3), дає визначення величини  $\tau$  для виразу (6):

$$\tau = \frac{1}{B_2} \left[ \left( \frac{A_2}{A_2 - C_2} \right)^{\frac{k_2-1}{2}} - 1 \right], \quad (9)$$

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

**Прийняті припущення й відхилення від реальності процесу наповнення.** По-перше, розрахований за залежністю (7) час має на увазі час витікання газів з ресиверів, і відрізняється від часу наповнення резер-

вуару на величину  $\Delta t$  перетікання компонентів суміші по магістралі, часу спрацьовування клапанів, перемішування в змішувачі тощо.

По-друге, об'єм компонентів суміші, що залишається в магістралі може бути визначений виходячи з геометрії проміжного тракту, проте, за рахунок суттєвого впливу теплообміну зі стінками магістралі похибка розрахунку маси компонентів суміші зі припущенням адіабатичності процесу суттєво впливає на результативну точність дозування.

По-третє, наведена методика розрахунку часу наповнення передбачає визначене співвідношення об'ємів ресиверів відповідно до співвідношення компонентів газової суміші, тобто при зміні паливної суміші об'єм одного з резервуарів потребує коригування.

І головне, моніторинг якості паливної суміші за її компонентним складом в системі керування генератором має відбуватися за масою компонентів, що увійшли до резервуару (камери згоряння), розрахованих за рівнянням стану для ідеального газу (закон Клапейрона – Менделєєва):

$$PV = \frac{m}{M} RT. \quad (10)$$

Проте слід зауважити, що проблемою коректного розрахунку маси в такому випадку є визначення осередненої за об'ємом резервуару температури газів, яка за рахунок повільного перемішування суттєво відрізняється від температури в точці вимірювання відповідним датчиком. Більш того, розміщення будь-яких сенсорів в робочій камері згоряння термоімпульсній машини взагалі неможливо через високі робочі температури і тиск. Тому має сенс встановлення сенсорів тиску й температури на місці стику магістрального тракту з резервуаром (камерою згоряння). У такому разі маса компонентів суміші в резервуарі може бути визначена як різниця між масами компонента, що вийшов з ресивера і залишився в магістральному тракту.

Крім того, керування процесом генерації суміші за наявними сенсорами тиску вимагає побудови закону зміни тиску в резервуарі від часу наповнення з урахуванням теплообміну газів зі стінками камери згоряння під час її циклічної роботи.

**Числове дослідження процесу наповнення резервуару компонентом газової суміші.** Моделювання досліджуваного процесу здійснено за методом скінчених елементів, який реалізовано у програмному продукті ANSYS Fluent [22]. Розрахункова 3D модель наведено підсистеми наведено на рис. 2.

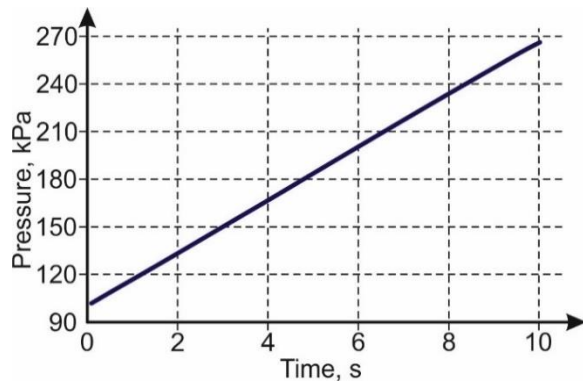


Рис. 2. Зміна тиску в резервуарі за часом наповнення

Детальний опис аналогічної скінчено-елементної моделі, визначальних рівнянь й налаштування вирішувача наведено у роботі [23]. Як вихідні дані для розрахунків прийняті такі значення для N2:

$$\rho = 1,251 \text{ кг/м}^3, M = 28,0134 \times 10^{-3} \text{ кг/Моль}, \\ k = 1,34, R = 297 \text{ Дж/(кг*К)}.$$

Початкові значення тиску в ресивері і резервуарі прийняті рівними 0,5 МПа й 0,1 МПа відповідно. Початкова температура в підсистемі 293 К. Об'єм резервуара становить  $15 \times 10^{-3} \text{ м}^3$ . Діаметр критичного отвору у змішувачі дорівнює 1 мм. Час перетікання газу 10 сек.

Для подальшого створення, налаштування й верифікації роботи цифрового близнюка отримано наступні результати моделювання. Визначено основні термодинамічні параметри нестационарної газодинамічної течії за період наповнення, а саме, зміна тиску в контрольній точці об'єму резервуару за часом наповнення (див. рис. 2); зміна температури в контрольній точці об'єму резервуару за часом наповнення (рис. 3); неоднорідність розподілу температури газу за об'ємом (рис. 4) й відхилення поточної температури газу в контрольній точці від осередненої за об'ємом, визначене за залежністю (11) (рис. 5); зміна маси компоненти суміші у резервуарі за часом наповнення (рис. 6), розрахована за залежністю (12); тощо.

Для визначення залежностей розрахункових параметрів процесу від часу використана мова CEL. Відхилення поточної температури газу в контрольній точці від осередненої за об'ємом визначене за залежністю:

$$\Delta(t) = 100\% \times \left( \frac{T(t)@Point - \text{volumeAve}(T(t))@Reservoir}{\text{volumeAve}(T(t))@Reservoir} \right). \quad (11)$$

Наявність числової моделі процесу дозволяє отримати якісну картину відпрацювання підсистеми наповнення, у подальшому дослідженні показано її використання в структурі цифрового близнюка.

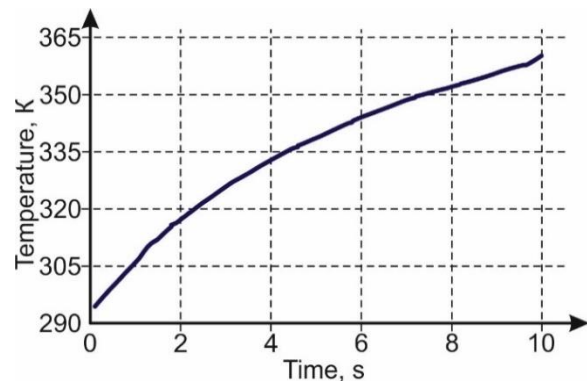


Рис. 3. Зміна температури газу в контрольній точці об'єму резервуару за часом наповнення

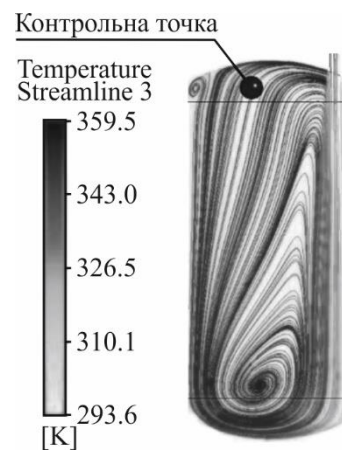


Рис. 4. Лінії рівня температури газу в момент наповнення резервуару

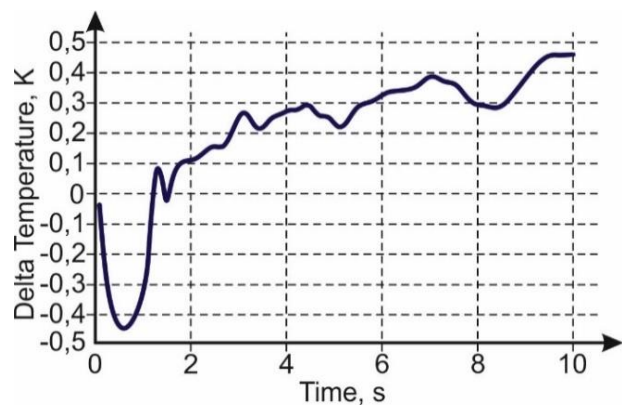


Рис. 5. Відхилення поточної температури газу в контрольній точці від осередненої за об'ємом

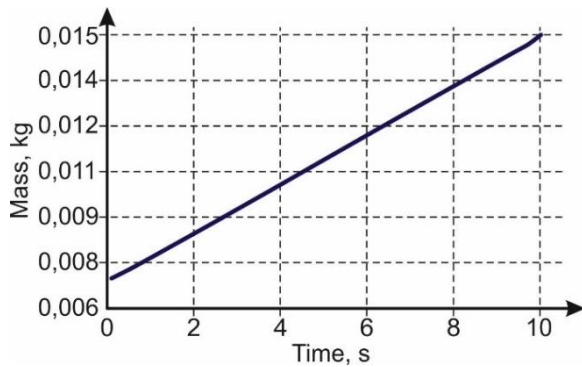


Рис. 6. Зміна маси газу в резервуарі за часом наповнення

Маса газу в розрахунковому об'ємі під час наповнення визначається інтегруванням значення густини газу:

$$m(t) = \text{volumeInt}(\rho(t)) @ \text{Volume} . \quad (12)$$

### Створення цифрового близнюка процесу наповнення резервуару компонентом газової суміші

Існує декілька способів побудови цифрових близнюків процесів, але спільним для них є принцип обробки й порівняння інформації, що надходить із реальних датчиків вимірювання параметрів процесу, зі показаннями віртуальних датчиків цифрового близнюка. Крім загального управління процесом, цифровий близнюк дозволяє виявляти та попереджувати порушення звичайної роботи устаткування або перебігу процесу та встановлювати причини їх виникнення. Робота цифрового близнюка може бути організована або в онлайн, або в офлайн режимах. Додатково цифрові близнюки можуть використовуватися для оцінки результатів різних стратегій управління. Саме побудова цифрових близнюків процесів гарантує швидке перенастроювання системи під конкретні завдання з автоматичним визначенням оптимального режиму досягнення передбаченої точності обробки [11, 12].

Компанія Ansys, Inc. пропонує концепцію цифрового близнюка з використанням технологій числового моделювання ANSYS Twin Builder [24]. Результати моделювання із застосуванням цифрових близнюків можуть бути калібровані на підставі робочих параметрів фізичного процесу. Прямий зв'язок між моделлю кінцевих елементів у звичайному її розумінні та схемою керування призводить до повільної швидкості розрахунку та прогнозування вихідних параметрів. Тому при розробці цифрового близнюка використовують моделі зниженого порядку (ROM). Створення ROM моделі можливо шляхом вивчення

фізики процесу та вилучення її глобальної поведінки з автономного моделювання. Безпосередньо її можна отримати на підставі попередніх результатів скінчено-елементного моделювання з урахуванням лише головних рис роботи системи та процесу. Оскільки обчислення результату в окремому цифровому ROM-об'єкті вимагає лише простих алгебраїчних операцій (наприклад, підсумовування векторів та оцінки поверхонь відповіді), обчислювальний процес не потребує багато технічних на часових ресурсів, а результат можна отримати майже в реальному часі. При параметричному моделюванні ROM ви можете оцінити модель і швидко досліджувати варіації результатів залежно від значень вхідних параметрів. Сказане зараз підкреслює важливість якісно створеної ROM-моделі під час моделювання роботи складної багатофункціональної системи.

Звичайно, результати цифрового близнюка будуть настільки достовірні, наскільки повними та всебічно описувочими були вхідні дані, які використовувалися для опису об'єкта або процесу, що моделюється. Найчастіше кількість розрахункових точок (точок-зйомки даних з натурної моделі) досягає величезних значень. З набору всіх згенерованих даних обирається декілька найбільш вірогідних характерних режимів, для яких в подальшому проводиться спрощений чисельний розрахунок. Таким чином, можна отримати розгорнуту картину роботи устаткування на різних режимах роботи. Для реалізації цього підходу в ANSYS Twin Builder існує особлива ієрархія вхідних даних. Наявність такої ієрархії файлів -даних є незаперечною перевагою, тому що відразу можна узгодити з цифровим близнюком (розрахунковою програмою) дані, що надходять з аналогових пристроїв-датчиків. Приклад такої структури даних подано на рис. 7.

```
./directory_name
./snapshots
./file1.bin
./file2.bin
./..
./inputField1_name[directory-optional]
./snapshots
./file1.bin
./file2.bin
./..
./inputField2_name[directory-optional]
./snapshots
./file1.bin
./file2.bin
./..
./doe.csv
./points.bin
./settings.json
```

Рис. 7. Структура вхідних даних для цифрового близнюка

Одна й та сама фізична система може бути відтворена різним набором інструментів бібліотеки Twin Builder, залежно від фокусу дослідження та наявності вхідних та потрібних вихідних даних.

### Розрахункові схеми числового близнюка

Основним елементом цифрового близнюка є розрахункова схема, що забезпечує інтегрування вирішувача ANSYS FLUENT [22] (рис. 8) визначення режимів роботи устаткування й моделювання роботи устаткування кожному з них.

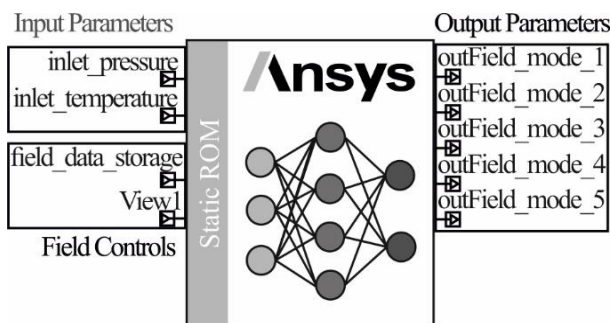


Рис. 8. Приклад елемента управління ANSYS-моделі зниженого порядку

Ліва частина схеми «Static ROM» відображає вхідні параметри процесу, які надходять або у вигляді сформованих табличних даних у кодї програми, або задаються в аналітичному вигляді, зокрема для досліджуваної моделі такими є зміна тиску і температур на вході в резервуар. Права частина цієї схеми представлений перелік можливих режимів роботи об'єкта, зокрема у нашому випадку очікувана маса компонента суміші та інші.

Вхідні дані можуть бути завантажені декількома способами. Простий спосіб полягає у прямому завантаженні спеціально підготовленої бази даних безпосередньо у вікні ROMBuilder. Або з використанням стандартних блок-схем графіків, наприклад, що описують вхідний сигнал аналітичними залежностями від часу (рис. 9).

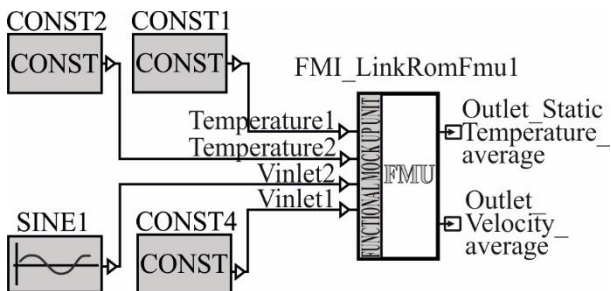


Рис. 9. Задання вхідних параметрів за допомогою стандартних блок-схем аналітичних функцій

Крім того, вхідні дані для моделювання поведінки суміші в робочій камері, як у досліджуваному випадку, можуть бути отримані за допомогою передачі даних про тиск і температур з відповідних датчиків.

Стандартні бібліотеки, наприклад «Sensors», містять цифрові аналоги практично будь-якого з існуючих датчиків тиску або температури. Для створення цифрового близнюка аналізованого контуру термомпульсної установки використано датчики: Absolut Pressure, Absolut Temperature.

Більш просунутий спосіб створення цифрового близнюка з можливістю моніторингу й зміни вхідних даних для розрахункової ROM моделі вимагає написання спеціальних програмних додатків, розширень користувачів або макросів. Також в ANSYS Twin Builder можна використати спрощену аналітичну модель попередньої частини системи за допомогою комплектуючих стандартних блоків власної бібліотеки TwinBuilder (рис. 10), або інтегрованої в нього бібліотеки компонентно-орієнтованої мови Modelica (рис. 11). Після цього цифровий близнюк досліджуваного процесу набуває схематичного виду.

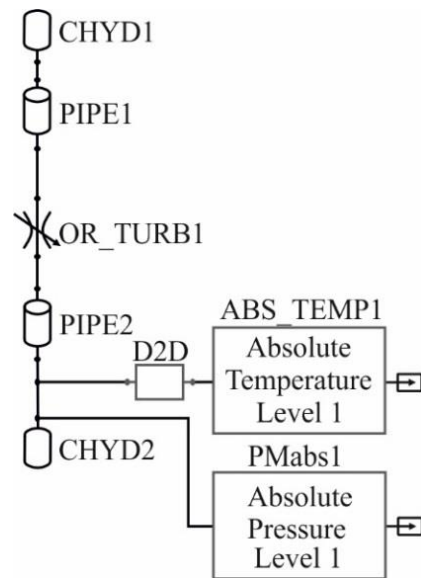


Рис. 10. Цифровий близнюк блоку наповнення резервуару за стандартною бібліотекою TwinBuilder

При побудові цифрових близнюків елементів системи наповнення були використанні стандартні елементи з бібліотек TwinBuilder та Modelica [24]: таблиця початкових умов, резервуар-джерело, труби, жиклер, резервуар-приймач, датчики та елементи управління вихідними параметрами (тиск, температура), тощо.

Для перегляду результатів існує велика різноманітність інструментарію, проте при створенні цифрового близнюка досліджуваного процесу, на кшталт наведених раніше залежностей від часу тиску (див. рис. 2) й температури (див. рис. 3), для візуалізації

графіків використано зазначені на рис. 12 інструменти “2D plot” програми TwinBuilder.

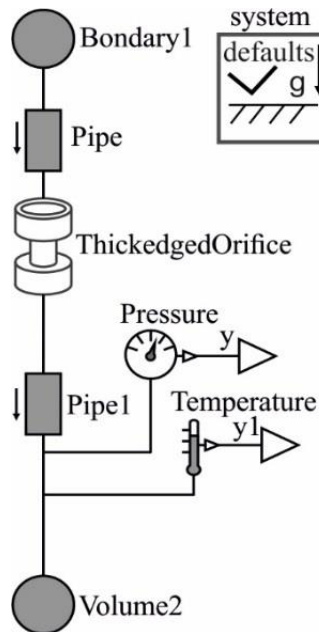


Рис. 11. Цифровий близнюк блоку наповнення резервуару за компонентно-орієнтованою мовою Modelica

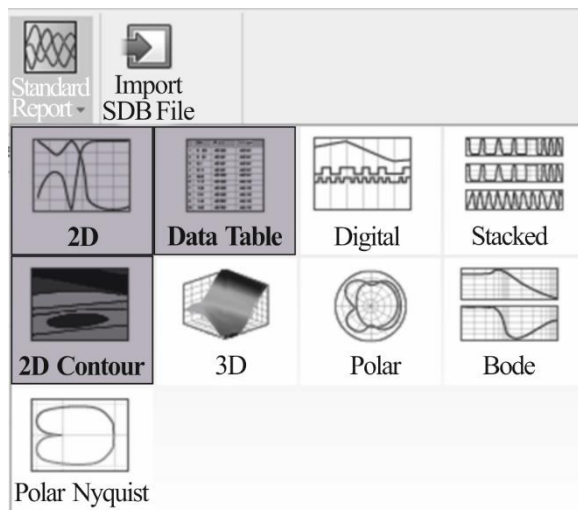


Рис. 12. Інструменти “2D plot” обробки та візуалізації режимів роботи цифрового близнюка

В подальшому дослідженні передбачається побудова ROM-модель для цифрового близнюка змішувача двокомпонентної газової суміші. Проведення порівняння роботи цифрового близнюка з обладнанням, оцінка точності вихідних параметрів числових експериментів з натурними. На завершальному етапі цифровий близнюк буде вбудований у автоматизовану систему керування процесом суміше утворення.

## Висновки

Відповідно до концепції цифровізації сучасного виробництва стосовно досліджуваної технології термомпульсної обробки обґрунтовано необхідність побудови цифрових близнюків для притаманних окремих фізико-хімічних процесів. Визначені особливості роботи генератора паливної суміші за методом критичних отворів й наведені відповідні визначальні рівняння дозування компонент газової суміші й часу наповнення резервуару.

Для подальшого використання в структурі цифрового близнюка відокремленої підсистему наповнення резервуару одним з компонентів газової суміші побудовано модель газодинамічної нестационарної течії й проведено числове дослідження з використанням програмного забезпечення ANSYS Fluent. Розроблена модель зниженого порядку (ROM модель ANSYS Fluent) та використана в ANSYS Twin Builder при побудові цифрового близнюка. Розроблені приклади цифрових близнюків системи наповнення резервуару газовою сумішшю за допомогою стандартних елементів бібліотек Twin Builder та Modelica.

## Література

1. Ramachandran, N. *The role of deburring in manufacturing: A state-of-the-art survey [Text]* / N. Ramachandran, S. S. Pande, N. Ramakrishnan // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1994. – Vol. 44, Iss. 1-2. – P. 1–13. DOI: 10.1016/0924-0136(94)90033-7.
2. Biermann, D. *Burr minimization strategies in machining operations [Text]* / D. Biermann, M. Heilmann // *Burrs – Analysis, Control and Removal*. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. – P. 13–20. DOI: 10.1007/978-3-642-00568-8\_2.
3. *Burr formation and its treatments – A review [Text]* / S. Y. Jin, A. Pramanik, A. K. Basak et al. // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 107, Iss. 5-6. – P. 2189–2210. DOI: 10.1007/s00170-020-05203-2.
4. *Improving the surface finish and other properties of engineering metal parts [Text]* / M. A. Obeidi, E. McCarthy et al. // *Key Engineering Materials*. – 2019. – Vol. 813. – P. 197–202. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.813.197.
5. Шипуль, О. В. *Современные методы финишной отделки кромок прецизионных деталей [Текст]* / О. В. Шипуль // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2015. – № 4 (121). – С. 16 – 25.
6. *Advanced thermal energy method for finish-ing precision parts [Text]* / S. Plankovskyy, V. Popov, O. Shypul et al. // *Advanced Machining and Finishing Handbooks in Advanced Manufacturing*. – 2021. – Chapter 15. – P. 527-575. DOI: 10.1016/C2018-0-00908-1.



7. Розроблення автоматизованого комплексу для прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами: наукові матеріали [Текст] : монографія / за ред. С. І. Планковського. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2020. – 318 с.

8. 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.

9. 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 No. 120332. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120332.

10. Reed, S. Modelling cycle for simulation digital twins [Text] / S. Reed, M. Löfstrand, J. Andrews // *Manufacturing Letters*. – 2021. – Vol. 28. – P. 54–58. DOI: 10.1016/j.mfglet.2021.04.004.

11. Enabling technologies and tools for digital twin [Text] / 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.

12. Cimino, C. Review of digital twin applications in manufacturing [Text] / C. Cimino, E. Negri, L. Fumagalli // *Computers in Industry*. – 2019. – Vol. 113. – P. 1–15. DOI: 10.1016/j.compind.2019.103130.

13. Usage of Digital Twins Along a Typical Process Development Cycle [Text] / P. Sinner, S. Daume, C. Herwig, J. Kager // *Advances in Biochemical Engineering Biotechnology*. – 2021. – Vol. 176. – P. 71–96. DOI: 10.1007/10\_2020\_149.

14. Brovkova, M. Implementation specifics and application potential of digital twins of technological systems [Text] / M. Brovkova, V. Molodtsov, V. Bushuev // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* – 2021. – Vol. 117. – P. 2279–2286. DOI: 10.1007/s00170-021-07141-z.

15. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification [Text] / W. Kritzing, M. Karner, G. Traar et al. // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51-11. – P. 1016–1022. DOI: 10.1016/J.IFACOL.2018.08.474.

16. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production [Text] / R. Söderberg, Kr. Wärmefjord, J. S. Carlson et al. // *Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 66, iss. 1. – P. 137–140. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.038.

17. Nonsingular Terminal Sliding Mode Control for a Variable Speed Wind Turbine System using Face Mock-Up Interface co-simulation [Text] / J. Robles, G. Baca, J. Chong et al. // *11th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering*. – 2021. – P. 158–164. DOI: 10.1109/CPEEE51686.2021.9383360.

18. Development of integrated hardware-in-the-loop (hil) test bench anti-lock brake system (abs) instrument [Text] / I. M. Nauri1, M. Ihwanudin1 et al. //

*Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1700. – Article no. 012097. DOI: 10.1088/1742-6596/1700/1/012097.

19. Спосіб приготування газової суміші заданого складу [Текст] : патент на корисну модель 146262 : МПК (2006) B01F 3/00 / Планковський С. І., Шипуль О. В. і др. ; власник Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» – № u202005803 ; заяв. 10.09.2020 ; опубл. 03.02.2021, Бюл. № 5. – 4 с.

20. Спосіб генерації газової суміші [Текст] : патент на винахід 125380 : МПК (2022.01) B01F 3/02 (2006.01), B01F 13/00, G05D 11/00 / Планковський С. І., Шипуль О. В. і др. ; власник Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» – № a 2018 10303 ; заяв. 17.10.2018 ; опубл. 02.03.2022, Бюл. № 9. – 4 с.

21. Dynamic method of gas mixtures creation for plasma technologies [Text] / S. Plankovskyy, O. Shypul, S. Zaklinskyy, O. Tryfonov // *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*. – 2018. – No. 5 (117). – P. 10–14.

22. ANSYS Fluent Reference Guide. Available at: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod\\_page.html?pn=Fluent&pid=Fluent&lang=en](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=Fluent&pid=Fluent&lang=en) (accessed 14.02.2022).

23. Determination of the mass of gas in a reservoir at filling with a mixture component under the pressure / O. Shypul, S. Plankovskyy, S. Zaklinskyy et al. // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2022. – Vol. 367. – P. 166–177. DOI: 10.1007/978-3-030-94259-5\_16.

24. ANSYS Twin Builder Reference Guide. Available at: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod\\_page.html?pn=Twin%20Builder&pid=TwinBuilder&lang=en](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=Twin%20Builder&pid=TwinBuilder&lang=en) (accessed 14.02.2022).

## References

1. Ramachandran, N., Pande, S. S. Ramakrishnan, N. The role of deburring in manufacturing: a state-of-the-art survey. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, vol. 44, iss. 1-2, pp. 1–13. DOI: 10.1016/0924-0136(94)90033-7.

2. Biermann, D., Heilmann, M. Burr minimization strategies in machining operations. *Burrs – Analysis, Control and Removal*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 13–20. DOI: 10.1007/978-3-642-00568-8\_2.

3. Jin, S. Y., Pramanik, A., Basak, A. K., Prakash, C., Shankar, S., Debnath, S. Burr formation and its treatments – a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 107, iss. 5-6, pp. 2189–2210. DOI: 10.1007/s00170-020-05203-2.

4. Obeidi, M. A., McCarthy, E., Ahad, I. Ul, Brabazon, D. Improving the surface finish and other properties of engineering metal parts. *Key Engineering Materials*, 2019, vol. 813, pp. 197–202. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.813.197.

5. Shipul', O. V. Sovremennyye metody finishnoi otdelki kromok pretsizionnykh detalei [Modern methods

of edge finishing of precision parts]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2015, no. 4 (121), pp. 16–25.

6. Plankovskyy, S., Popov, V., Shypul, O., Tsegelnyk, Y., Tryfonov, O., Brega, D. Advanced thermal energy method for finishing precision parts. *Advanced Machining and Finishing Handbooks in Advanced Manufacturing*, 2021, Chapter 15, pp. 527–575. DOI: 10.1016/C2018-0-00908-1.

7. Plankovskyy, S. *Rozroblennyya avtomatyzovanooho kompleksu dlya pretsyziynoho termoimpul'snoho obroblennyya detonuval'nyhmy hazovymy sumishamy: naukovy materialy : monohrafiya* [Development of an automated complex for precision thermal pulse processing with detonating gas mixtures: scientific materials : monograph]. Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovsk'oho «Kharkiv. aviats. in-t», 2020. 318 p.

8. 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.

9. 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, no. 161, article no. 120332. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120332.

10. Reed, S., Löfstrand, M., Andrews, J. Modelling cycle for simulation digital twins. *Manufacturing Letters*, 2021, vol. 28, pp. 54–58. DOI: 10.1016/j.mfglet.2021.04.004.

11. Qinglin, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., Nee, A. Y. C. Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, vol. 58 (B), pp. 3–21. DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.10.001.

12. Cimino, C., Negri, E., Fumagalli, L. Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, 2019, no. 113, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.comind.2019.103130.

13. Sinner, P., Daume, S., Herwig, C., Kager, J. Usage of Digital Twins Along a Typical Process Development Cycle. *Advances in Biochemical Engineering Biotechnology*, 2021, no. 176, pp. 71–96. DOI: 10.1007/10\_2020\_149.

14. Brovkova, M., Molodtsov, V., Bushuev, V. Implementation specifics and application potential of digital twins of technological systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 117, pp. 2279–2286. DOI: 10.1007/s00170-021-07141-z.

15. Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51-11, pp. 1016–1022. DOI: 10.1016/J.IFACOL.2018.08.474.

16. Söderberg, R., Wärmefjord, Kr., Carlson, J. S., Linkvist, L. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production. *Manufacturing Technology*, 2017, vol. 66, iss. 1, pp. 137–140. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.038.

17. Robles, J., Baca, G., Chong, J., Gonzales, S. Nonsingular Terminal Sliding Mode Control for a Variable Speed Wind Turbine System using Face Mock-Up Interface co-simulation. *Proc. 11th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering*, 2021, pp. 158-164. DOI: 10.1109/CPEEE51686.2021.9383360.

18. Nauri, I. M., Ihwanudin, M. et al. Development of integrated hardware-in-the-loop (hil) test bench anti-lock brake system (abs) instrument. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1700, article no. 012097. DOI: 10.1088/1742-6596/1700/1/012097.

19. Plankovskyy, S. I., Shypul', O. V., Zaklinskyy, S. O., Tsegelnyk, Y. V., Kombarov, V. V., Tevzadze, G. S., Garin, V. O. *Sposib prigotuvannya gazovoï sumishi zadanogo skladu* [The method of preparing a gas mixture of a given composition]. Patent UA, no. 146262, 2021.

20. Plankovskyy, S. I., Shypul', O. V., Tryfonov, O. V., Zaklinskyy, S. O., Tevzadze, G. S. *Sposib generaciyi gazovoï sumishi* [The method of generating a gas mixture]. Patent UA, no. 125380, 2022.

21. Plankovskyy, S. I., Shypul, O. V., Zaklinskyy, S. A., Dynamic method of gas mixtures creation for plasma technologies. *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*, 2018, no. 5 (117), pp. 10–14.

22. *ANSYS Fluent Reference Guide*. Available at: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod\\_page.html?pn=Fluent&pid=Fluent&lang=en](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=Fluent&pid=Fluent&lang=en) (accessed 14.02.2022).

23. Shypul, O., Plankovskyy, S., Zaklinskyy, S., Pavlenko, O., Garin, V. Determination of the mass of gas in a reservoir at filling with a mixture component under the pressure. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, vol. 367, pp. 166–177. DOI: 10.1007/978-3-030-94259-5\_16.

24. *ANSYS Twin Builder Reference Guide*. Available at: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod\\_page.html?pn=Twin%20Builder&pid=TwinBuilder&lang=en](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=Twin%20Builder&pid=TwinBuilder&lang=en) (accessed 14.02.2022).

Надійшла до редакції 15.08.2022, розглянута на редколегії 28.09.2022

#### DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN OF FILLING THE TANK WITH A GAS MIXTURE

Vadim Garin, Denys Tkachenko, Olga Shypul, Sergiy Zaklinskyy, Oleg Tryfonov, Sergiy Plankovskyy

The research subject is a digital twin of the process of filling the tank with gas mixture components. The aim is to justified choose the digital twin model of the tank filling process with a gas mixture. The task of the study consists

of the analysis of construction methods and the operation modes of the digital twin as well as selecting the operation settings of the digital twin model, which ensure a rational reproduction of the gas-dynamic non-stationary of the tank filling process with a component of the gas mixture. **The following results** were obtained. In accordance with the digitalization concept of modern production, the need to build digital twins for individual physical and chemical processes is substantiated in relation to the researched thermal pulse processing technology. The specifics of the operation of the fuel mixture generator using the critical hole method are determined and the corresponding defining equations for the dosing of gas mixture components and the tank filling time are given for constructing a control system using a digital twin of the process. Existing methods of building digital twins similar to the system under study are analyzed. For further use in the structure of a digital twin of a separate tank filling subsystem, a component of the gas mixture, a finite-element model of gas-dynamic unsteady flow was built and a numerical study was conducted using the ANSYS Fluent software. The dependence on the tank filling time of such basic parameters of the process under study as pressure, temperature, and filled mass of the gas mixture was determined. Reasoned feasibility and developed reduced-order model (ROM model ANSYS Fluent) and used in ANSYS Twin Builder to build a digital twin. Developed and analyzed examples of digital twins of the system of filling the tank with a gas mixture using standard elements of the Twin Builder and Modelica libraries.

**Keywords:** digital twin; reduced-order model; numerical simulation; thermal pulse finishing treatment.

**Гарін Вадим Олегович** – канд. техн. наук, старш. наук. співроб. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Ткаченко Денис Анатолійович** – асист. каф. міцності літальних апаратів, науковий співробітник кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

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

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

**Трифонов Олег Валерійович** – канд. техн. наук, доц. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Планковський Сергій Ігорович** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна.

**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.

**Denys Tkachenko** – lecturer of Aircraft Strength Department, Researcher of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: d.tkachenko@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5006-6775.

**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.

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

**Oleg Tryfonov** – PhD, Associate Professor of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.trifonov@khai.edu, ORCID: 0000-0001-8058-8649, Scopus Author ID: 57192959255.

**Sergiy Plankovskyy** – Doctor of Techn. Sci., Professor, Head of Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine, e-mail: sergiy.plankovskyy@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2908-903X, Scopus Author ID: 24473286300.