

УДК 621.396.6.019:536.5.001.24

МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ КРИЗЬ ТОНКІ ЧАСТКОВО ПРОНИКНІ СТІНКИ

Круковський П.Г.¹ докт. техн. наук, Дядюшко Є.В.²

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна

¹професор, orcid.org/0000-0001-6726-0550, e-mail: kruk_2@ukr.net²молодший науковий співробітник, orcid.org/0000-0002-2601-4633, e-mail: diadiushko@i.ua<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2024.5>

Розглядається модель переносу теплоти і маси (повітря) через тонкі стінки (в роботі названі частково проникними), що складаються з певної кількості металевих листів, через площу яких переноситься тільки теплота, а маса тільки через не достатньо герметичні шви в місцях з'єднання листів. Такі стінки застосовуються як огорожувальні конструкції різноманітних промислових об'єктів, зокрема металевих оболонок Нового Безпечного Конфайнмента ЧАЕС, для яких чисельне моделювання переносу повітря саме через шви між листами викликає значні труднощі внаслідок їх великої протяжності і невизначеності площ протічок. В роботі пропонується модель, за якою теплота і маса переноситься рівномірно через всю поверхню стінки і розрахунок витрат маси і теплоти виконується відповідно до знаків і значень локальних перепадів тиску між розрахунковими комірками з обох сторін стінки. Модель працює аналогічно моделі пористої стінки, але на відміну від неї враховує спряжений і радіаційний теплообмін при застосуванні CFD-моделювання.

The model of heat and mass (air) transfer through thin walls (referred to in the work as partially permeable), consisting of a certain number of metal sheets, through the area of which only heat is transferred, while the mass is transferred only through not sufficiently airtight seams at the joints of the sheets, is considered. Such walls are used as enclosing structures of various industrial facilities, in particular the metal shells of the New Safe Confinement of the Chernobyl NPP, for which the numerical modeling of air transfer specifically through the seams between the sheets poses significant difficulties due to their great lengths and the uncertainty of the leakage areas. The work proposes a model according to which heat and mass are transferred evenly through the entire surface of the wall, and the calculation of mass and heat expenses is carried out according to the signs and values of local pressure drops between the computational cells on both sides of the wall. The model works similarly to the model of a porous wall, but unlike it, it takes into account conjugated and radiative heat transfer when applying CFD modelling.

Бібл. 6, табл. 3, рис. 4.

Ключові слова: частково проникні стінки, тепло- і масообмін, CFD-моделювання.CFD – Computational Fluid Dynamics;
НБК – Новий Безпечний Конфайнмент;**Індекси:**

цил – циліндрична стінка;

-x – у від'ємному напрямку осі X;

+x – у позитивному напрямку осі X;

-z – у від'ємному напрямку осі Z;

+z – у позитивному напрямку осі Z;

внутр – внутрішній;

вх – вхідний;

вих – вихідний.

Вступ

Для тривалого функціонування промислових об'єктів необхідно виконувати детальний аналіз термогазодинамічного стану як на етапі проектування, так і на етапі експлуатації. За частоту ці об'єкти мають в своїх стінах або оболонках численні малі щілини та/або отвори (наприклад оболонки великих промислових об'єктів, що складаються з великої кількості непроник-

них металевих листів, з'єднаних між собою не достатньо герметичними швами). В цьому випадку такі оболонки чи стіни можна вважати частково проникними. У сучасних реаліях, коли все більше уваги приділяється дослідженням за допомогою комп'ютерного моделювання, дуже важливо мати інструмент, який дозволить правильно враховувати як газодинамічний, так і тепловий стан зазначених об'єктів.

Складності в моделюванні термогазодинамічного стану об'єктів з частково проникними стінками та/або оболонками можуть бути наступними:

- невизначеність точного розташування та кількості маленьких щілин і отворів між швами на стінках/оболонках;

- дуже висока складність або навіть неможливість їх обліку при побудові геометричної моделі з стінками та/або оболонками для подальших розрахунків;

- значне збільшення кількості розрахункових комірок у місцях розташування маленьких щілин та отворів в швах, що призводить до значного та небажаного збільшення часу розрахунку.

Таким чином CFD-моделювання переносу маси через численні шви між листами є проблемою, тому в роботі пропонується перенос теплоти в маси виконувати через загальну площу тонких стінок. Слід зазначити, що для таких цілей можна використовувати модель пористої стінки, але вона не враховує спряжений і радіаційний теплообмін обох поверхонь такої стінки з потоками повітря і іншими стінками.

Одним з об'єктів, в якому присутні такі частково проникні оболонки, є Новий Безпечний Конфайнмент (НБК) ЧАЕС [1], зовнішня оболонка якої на стадії будівництва представлена на рис. 1.

В даній роботі перед авторами постала задача розробки підходу до моделювання стінок з невизначеними нещільностями, який буде використовуватися при 3D-моделюванні термогазодинамічного стану НБК ЧАЕС. Представлення стінки як твердої, а не пористої дозволяє врахувати радіаційний теплообмін з поверхнями внутрішніх конструкцій та зовнішнім середовищем, і спряжений теплообмін всередині та назовні об'єкту, а також масообмін з оточуючим середовищем та між внутрішніми оболонками. Попри цього виникає можливість суттєвого зменшення кількості розрахункових комірок моделі і часу обчислення.

Через неможливість проведення додаткових досліджень безпосередньо стін НБК та, взагалі, передбачення місць розташування нещільностей, разом з наведеною нижче моделлю і розробленою для неї додатковою підмоделлю були використанні оцінки площ негерметичностей НБК [2-4], і аналізу тисків при зовнішньому обтіканні НБК [5], які впливають на термогазодинамічний і радіаційний стан як НБК, так і оточуючого середовища.

Мотивація і мета роботи

Мотивація – для адекватного моделювання термогазодинамічного стану об'єктів, які мають "недосліджені нещільності" (мається на увазі наявність приблизної інформації про загальні значення нещільностей, але не про місця їх точних розташувань), в наявних CFD-інструментах немає вбудованих моделей, які дозволили б урахувати одночасно перенос маси і тепла через стінки з урахуванням спряженого і радіаційного теплообміну. Тому існує необхідність у створенні такої моделі (підмоделі).

Мета – розробити підмодель тепло- та масопереносу через тверду стінку (частково проникну), яка дозволить враховувати спряжений та радіаційний теплообмін стінки з оточуючими її поверхнями, а також перенос маси газу або рідини через цю стінку.

Методологія моделювання частково проникних стінок

Для перетворення непроникної стінки на частково проникну було обрано підхід виділення одинарного (товщиною в 1 комірку) прилеглого шару комірок з обох боків від стінки та створення в цих шарах джерел/стоків тепла/маси/імпульсів тощо, які будуть розраховуватися для сформованих, що мають спільну поверхню контакту через стінку.

Такий підхід дозволить зберігати баланси маси та тепла в моделі, а також отримувати точні розподіли параметрів за всіма точками поверхні. При цьому



Рис. 1. Зовнішня оболонка НБК ЧАЕС на стадії будівництва [1]

геометрія стінки може бути спрощена до поверхні без товщини, яка зможе приймати участь в радіаційному та спряженому теплообміні, а також в кондуктивному теплообміні через цю стінку з довільною віртуальною товщиною, яка не потребує додаткових розрахункових комірок в програмних середовищах ANSYS.

Інструментом для вирішення задачі було обране програмне середовище ANSYS Fluent, яке дозволяє вирішувати і теплові, і гідродинамічні задачі, а, також, має великі можливості для створення додаткових функцій для різноманітних підмоделей.

При виведенні рівнянь для розрахунку джерел та стоків теплоти та маси за основу був взятий підхід до організації масообміну через пористе середовище, вбудований в середовище ANSYS Fluent. (логіка підходу та граничні умови для наступної верифікаційної задачі моделі стінки показані на рис. 2.)

В цьому підході пористі середовища моделюються як об'єми з додатковими джерелами імпульсів швидкості, доданими до стандартних рівнянь руху. (1)-(4) Ці джерела складаються з двох частин: в'язкісні втрати та інерційні втрати (1) [6]. Для спрощення переводу очікуваних сумарних площ негерметичностей оболонок, було вирішено сприймати рух через ці негерметичності перпендикулярним поверхні стінки та залишити тільки складову інерційних втрат.

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} \cdot v_i + C_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot |v| \cdot v_i\right) \quad (1)$$

де S_i – джерело імпульсу в одному з базових напрямків, Н/м³

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с.

α – проникність пористого об'єму.

ρ – густина рідини, кг/м³.

C_2 – інерційний опір пористого об'єму, 1/м.

v_i – швидкість рідини одному з базових напрямків, м/с.

Для вірного врахування напрямку руху потоку через частково проникну стінку критерієм буде перепад тиску (2), який можна прив'язати до джерел імпульсів швидкостей з [6]:

$$\Delta p = -S_i \cdot \Delta n \quad (2)$$

де Δp – перепад тиску, Па.

Δn – товщина пористого об'єму, м.

Виходячи з двох попередніх формул були сформовані вирази для джерел/стоків маси для комірок з обох сторін стінки (3), (4):

$$M_i = \frac{j \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho \cdot k \cdot (P_1 - P_2)}{C_2 \cdot \Delta n}} \cdot S}{V_i} \quad (3)$$

Для $i = 1$: при $P_1 > P_2 - j = -1$, $k = 1$, $P_2 \geq P_1 - j = 1$, $k = -1$.

Для $i = 2$: при $P_1 > P_2 - j = 1$, $k = 1$, $P_2 \geq P_1 - j = -1$, $k = -1$.

де M_i – джерело/стік маси в комірці на стороні i -ої поверхні, кг/(с·м³).

ρ – густина, кг/м³.

P_1 – тиск в комірці на стороні 1 поверхні, Па.

P_2 – тиск в комірці на стороні 2 поверхні, Па.

S – дотична площа комірки з поверхнею, м².

C_2 – інерційний опір частково проникної стінки, 1/м.

Δn – товщина «реальної» стінки, м.

V_i – об'єм комірки на стороні i -ої поверхні, м³.

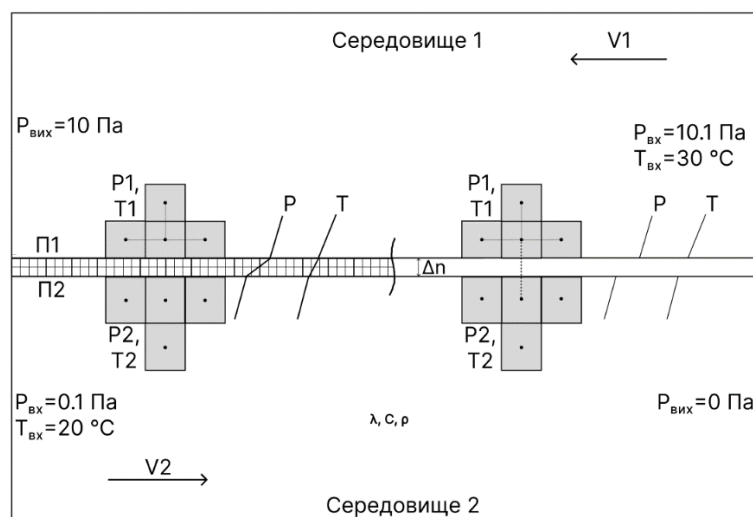


Рис. 2. Тепломасообмін через пористу (зліва) і частково проникну (справа) стінки

j – коефіцієнт для врахування напрямку руху рідини через частково проникну стінку.

k – коефіцієнт для універсалізації вигляду функції.

Слід зазначити, для використання даної функції необхідно знати питомий інерційний опір C_2 досліджуваної стінки, який можна визначити експериментальними та/або аналітичними способами. Автори статті, досліджуючи гідродинамічний стан НБК ЧАЕС, визначали C_2 за допомогою моделі ділянки пористої стінки, підбираючи коефіцієнт опору таким чином, щоб питомі витрати через стінку відповідали питомим витратам через оболонки НБК, які були визначені в [2-4].

Використовуючи таку ж саму логіку і отримані рівняння, були виведені вирази для джерел/стоків теплоти, що переноситься масою рідини (4):

$$Q_{vi} = M_i \cdot (H_1 - H_2) \cdot k \quad (4)$$

Для $i = 1$: при $P_1 > P_2 - k = 1$, $P_2 \geq P_1 - k = -1$.

Для $i = 2$: при $P_1 > P_2 - k = 1$, $P_2 \geq P_1 - k = -1$.

де Q_{vi} – джерело/стік теплоти в комірці на стороні i -ої поверхні, Вт/м³.

H_1 – ентальпія в комірці на стороні 1 поверхні, Дж/кг.

H_2 – ентальпія в комірці на стороні 2 поверхні, Дж/кг.

M_i – джерело/стік маси в комірці на стороні i -ої поверхні, кг/(с·м³).

k – коефіцієнт для універсалізації вигляду функції.

Верифікація підмоделі тепломасопереносу через частково проникну стінку

Для перевірки працездатності розробленої підмоделі тепломасопереносу крізь непроникну стінку було вирішено провести якісне та кількісне порівняння з моделлю з пористою стінкою в аналогічній стаціонарній постановці (рис.2). Такий підхід дозволить переконатися в адекватності розрахунку масопереносу та теплопереносу. При цьому характеристики частково проникної стінки будуть максимально наближені до пористої стінки, щоб забезпечити можливість верифікування. Наявність спряженого та радіаційного теплообміну для частково проникної стінки в більш практичних застосу-

ваннях буде забезпечена автоматично програмним середовищем (ANSYS Fluent).

Підмодель тепломасопереносу реалізована за допомогою User-Defined Function (UDF-функції).

Модель представляє собою об'єм із розмірами 30x20x4 см (рис. 2), що має посередині горизонтальну перегородку товщиною 2 см.

У випадку частково проникної стінки з підмоделлю – товщина віртуальна, відстань до плоскої стінки – 10 см.

Фізична постановка:

Кожен з двох утворених об'ємів має свої поверхні входу та виходу рідини, які, в свою чергу, мають різні граничні умови, зазначені на рис. 2.

Перепади тиску між входом та виходом в об'ємах забезпечують різнонаправлений рух потоку повітря в них. А перепад тиску між об'ємами – переток через пористу або частково проникну стінку.

Робоча рідина – повітря.

Створена підмодель використовується в розрахунках термогазодинамічного та радіаційного стану НБК ЧАЕС, для урахування неорганізованих витрат повітря через нещільності конструкції, отже інерційний опір роздільних стінок в моделі був підібраний на тестовій моделі питомої пористої стінки таким чином, щоб відповідати проникностям зовнішньої оболонки НБК ЧАЕС, оціненим авторами [2-4], тобто рівним $7.1 \cdot 10^9$ 1/м.

Для верифікації адекватності роботи створеної підмоделі було проведено порівняння таких параметрів, як: витрата через перегородку, середні витрати в об'ємах та середні температури на поверхнях перегородки (табл. 1) показало фізичність, якісну та кількісну вірність роботи підмоделі.

Моделювання обтікання аروحної конструкції

Для демонстрації можливого використання розробленої підмоделі частково проникної стінки в моделюванні об'єкту типу НБК ЧАЕС було вирішено створити спрощену гідравлічну модель обтікання аروحної конструкції (рис. 3) в стаціонарній постановці.

Фізична постановка:

В центрі об'єму повітря з розмірами 14x14x4 м розташована аручна конструкція розмірами 2x2x1.1 м (у випадку з пористою стінкою її товщина складає 0.02 м).

Таблиця 1. Результати верифікаційних розрахунків

Параметр	Пориста стінка	Частково проникна стінка
Витрата через перегородку, кг/с	$4.89 \cdot 10^{-6}$	$4.86 \cdot 10^{-6}$
Середні температури на поверхнях перегородки, °C	28.6; 21.6	28.6; 21.4
Рівень витрат у верхньому об'ємі, кг/с	0.00146	0.0018
Рівень витрат у нижньому об'ємі, кг/с	0.0013	0.0018

В арочній конструкції передбачені отвори 0.1×0.2 м на поверхнях по осі Х, які являють собою аналоги можливих технічних воріт, наприклад пожежних.

Робоча рідина – повітря.

Нагнітання повітря для обтікання відбувається з постійною швидкістю 3 м/с.

Створена підмодель використовується в розрахунках термогазодинамічного та радіаційного стану НБК ЧАЕС, для урахування неорганізованих витрат повітря через нещільності конструкції, отже інерційний опір роздільних стінок в моделі був підібраний на тестовій моделі питомої пористої стінки таким чином, щоб відповідати проникностям зовнішньої оболонки НБК ЧАЕС, оціненим авторами [2-4], тобто рівним $7.1 \cdot 10^9$ 1/м. Теплова задача не моделювалась.

При вирішенні задачі обтікання поля тисків (рис. 4) моделей з частково проникною оболонкою конструкції та пористою оболонкою виявилися практично ідентичними.

Також були кількісно порівняні витрати крізь розглянуті оболонки (табл. 2) та тиски (відносно атмосферного тиску 101325 Па) на поверхнях та у внутрішньому повітряному просторі (табл. 3).

Кількісне порівняння витратних та тискових параметрів дало змогу підтвердити раніше помічену відповідність отриманих результатів. Невелика різниця у внутрішніх тисках може бути пояснена принциповим представленням пористих оболонок у програмі ANSYS Fluent у вигляді областей з джерелами/стоками імпульсів швидкостей, на відміну від твердої плоскої поверхні у випадку частково проникної стінки.

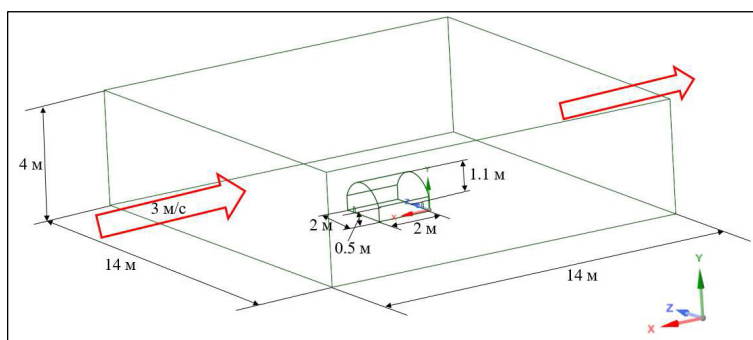


Рис. 3. Геометрія задачі моделювання обтікання арочної конструкції

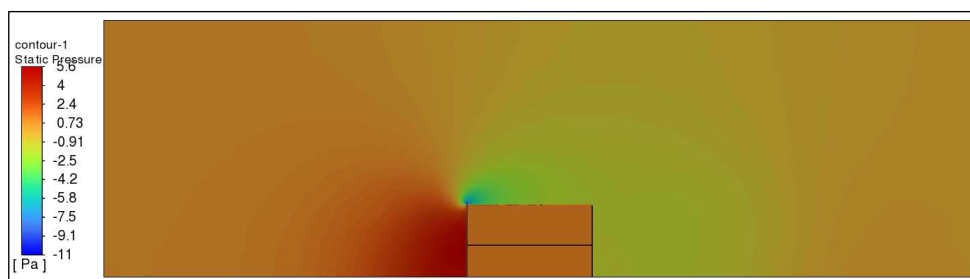


Рис. 4. Поле тисків у поздовжньому перерізі області рішення

Табл. 2. Кількісне порівняння витратних параметрів

Параметр	Частково проникна стінка	Пориста стінка
М цил, кг/с	0.00131	0.00120
М -x, кг/с	0.00038	0.00037
М +x, кг/с	-0.00035	-0.00037
М -z, кг/с	0.00027	0.00022
М +z, кг/с	0.00025	0.00025
G вх, кг/с	197.68	197.68
G вих, кг/с	-197.68	-197.68

Табл. 3. Кількісне порівняння тискових параметрів

		Параметр	Частково проникна стінка	Пориста стінка
внутр		Р внутр, Па	1.513	1.200
		Р цил, Па	1.520	1.201
		Р -х, Па	1.539	1.204
		Р +х, Па	1.511	1.184
		Р -z, Па	1.533	1.198
		Р +z, Па	1.576	1.205
зовн		Р цил, Па	-2.995	-2.843
		Р -х, Па	-0.993	-1.407
		Р +х, Па	3.938	4.095
		Р -z, Па	-2.983	-2.245
		Р +z, Па	-2.910	-2.980

Для використання даної підмоделі необхідно знати питомий інерційний опір C_2 досліджуваної стінки, який можна визначити експериментальними та/або аналітичними способами. Автори статті, досліджуючи гадродинамічний стан НБК ЧАЕС, визначали C_2 за допомогою моделі ділянки пористої стінки, підбираючи коефіцієнт опору таким чином, щоб питомі витрати через стінку відповідали питомим витратам через оболонки НБК, які були визначені в [2-4].

Висновки

1. Створено додаткову підмодель для симуляції переносу теплоти та маси крізь напівпроникні тверді стінки, придатні для CFD-моделювання (наприклад, в ANSYS Fluent).

2. Підмодель дозволяє працювати з комірками, що граничать з поверхнями, які, в такому випадку, можна вважати напівпроникними. У протилежних комірках формуються джерела або стоки маси (рахуються в залежності від ряду параметрів) та теплоти (визначаються відповідно до джерел маси та різниці ентальпій). Підмодель була верифікована за допомогою тестових моделей і показали позитивні результати.

3. Створена підмодель використовується разом з моделлю обтікання НБК ЧАЕС та програмою для моделювання термогазодинамічного стану об'єкту та оточуючого середовища і визначення площ протічків в оболонках НБК.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Новый безопасный конфайнмент* Чернобыльской АЭС (расчетно-экспериментальный анализ при проектировании и эксплуатации): монография/ Круковский П.Г., Метель М.А., Скляренко Д.И. и др.; за ред. П.Г. Круковского, В.А. Краснова, В.П. Сулимова/ Киев: ООО "Франко Пак", 2019. ISBN 978-966-97864-7-0. 300с.

2. Круковский П. Г, Скляренко Д. І, Дядюшко Є. В., Кондратенко С. О. Аналіз неорганізованого повітрообміну Нового Безпечного Конфайнменту з оточуючим середовищем (попередні результати моделювання за експлуатаційними даними) // V міжнародна конференція «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища» INUDECO, 27–29 квітня, 2020 р., м. Славутич, Україна. – с.109-117.

3. Krukovskyi P., Diadiushko Y., Sklyarenko D., Starovit I. Unorganized air releases with radioactive aerosols from the New Safe Confinement of CHNPP into the environment. Питання атомної науки та техніки. 2021. №6 (136) С. 181-186. DOI: <https://doi.org/10.46813/2021-136-181>

4. Дядюшко Є.В., Скляренко Д.І., Старовіт І.С. Неорганізований повітрообмін Нового Безпечного Конфайнменту ЧАЕС з оточуючим середовищем. Проблеми Теплофізики та Теплоенергетики: Матеріали XII Міжнародної онлайн-конференції, м. Київ, 26-27 жовтня 2021 р. / Інститут Технічної Теплофізики НАН України

5. Krukovsky, P., Diadiushko, Y., Skliarenko, D. (2023). Розробка розрахункової моделі зовнішнього обтікання нового безпечного конфайнмента ЧАЕС. Ядерна та радіаційна безпека, №4(100), 71-79. [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4\(100\).08](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4(100).08)

6. ANSYS, Inc. ANSYS Fluent User Guide. Версія 19.1, ANSYS, Inc., 2019. Інструкція з програмного забезпечення

MODEL OF HEAT AND MASS TRANSFER THROUGH THIN PARTIALLY PERMEABLE WALLS

P. Krukovsky¹, Ye. Diadiushko²

*Institute of Engineering Thermophysics of the National
Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st.,
Kyiv, 03057, Ukraine*

¹Dr. Sci. (Engin.), Head of Department, Professor, orcid.
org/0000-0001-6726-0550, e-mail: kruk_2@ukr.net

²Junior researcher, orcid.org/0000-0002-2601-4633,
e-mail: diadiushko@i.ua

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2024.5>

The model under consideration addresses the transfer of heat and mass (air) through thin walls, described as partially permeable, which are composed of numerous impermeable metal sheets joined together by seams that are not entirely airtight and are permeable to mass. Such walls are found in large industrial facilities in the form of roofs and shells, covering areas of tens of thousands of square meters with metal sheets and tens of kilometers of seams between them. Therefore, modeling the transfer of heat and mass through these thin walls, which are subject to pressure differentials, poses a significant challenge not fully addressed by current CFD models. While modeling the part of heat transfer across the general surface area of thin walls is relatively straightforward, accurately modeling the transfer of mass and heat fraction through the numerous seams between sheets is problematic with CFD technology.

This work proposes a method for calculating mass flowrates and the heat fraction through the seams between sheets, distributing it across the entire surface area of the wall according to the signs and values of local pressure differentials between the calculation cells on both sides of the wall. It is noted that while a porous wall model could be used for such purposes, it does not account for the conjugate and radiative heat exchanges between both surfaces of such a wall with airflows and other walls. Unlike this approach, the proposed model incorporates conjugate and radiative heat exchanges and can also accommodate a wall of zero thickness, significantly reducing the number of cells in the

main model required for CFD simulation. This submodel has been verified on number of simplified cases and currently applied to simulate air and moisture exchange through the inner and outer shells of the New Safe Confinement of the Chernobyl Nuclear Power Plant.

Ref. 6, tables 3, figures 4.

Keywords: partially permeable walls, heat and mass transfer, CFD-modelling.

1. P.G. Krukovskiy, M.O. Metel, D.I. Skliarenko, et al. Novyi Bezopasnyi Konfainment Tchernobylskoi AES (raschetno-eksperimentalnyi analiz pri proektirovanii i ekspluatatsyi) [New safe confinement of the Chernobyl nuclear power plant (computational and experimental analysis in the design and operation)]. Kiev: OOO "Franko Pak" [Publishing house of LLC "Franco Pak"], 2019, p. 300 (in Rus.)

2. Krukovskiy P.H., Skliarenko D.I., Diadiushko Ye.V., Kondratenko S.O. Analiz neorhanizovannoho povitroobminu Novoho Bezpechnoho Konfainmentu z otochuiuchym seredovyshe (poperedni rezultaty modeliuвання za ekspluatatsiynymi danymi) [Analysis of the unorganized air exchange of the New Safe Confinement with the surrounding environment (preliminary simulation results based on operational data)] // V mizhnarodna konferencia "Problemy zniattia z ekspluatatsii ob'ektiv yadernoi enerhetyky I vidnovlennia navkolyshniogo seredovysha" INUDECO [V International Conference "Problems of Decommissioning of Nuclear Power Facilities and Environmental Restoration" INUDECO], April 27–29, 2020, Slavutych, Ukraine. – pp.109-117. (in Ukr.)

3. Krukovskiy P., Diadiushko Y., Sklyarenko D., Starovit I. Unorganized air releases with radioactive aerosols from the New Safe Confinement of CHNPP into the environment. PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY. 2021. №6 (136) C. 181-186. DOI: <https://doi.org/10.46813/2021-136-181>

4. Diadiushko Ye.V., Skliarenko D.I., Starovit I.S. Neorhanizovanyi povitroobmin Novoho Bezpechnoho Konfainmentu CHAES z otochuiuchym seredovyshe [Unorganized air exchange of the New Safe Confinement of the Chernobyl Nuclear Power Plant with the surrounding environment]. Problemy Teplofizyky ta teploenerhetyky: Materialy XII Mizhnarodnoi onlain-konferencii [Problems of Thermophysics and Thermal Power Engineering: Proceedings of the XII International Online Conference], Kyiv, October 26-27, 2021 / Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine (in Ukr.)

5. Krukovsky, P., Diadiushko, Y., Skliarenko, D. (2023). Rozrobka rozrakhunkovoi modeli zovnishniogo obtikannia novoho bezpechnoho konfainmentu CHAES [Development of a CFD-Model for the External Flow Around the New Safe Confinement of ChNPP]. Yaderna ta radiatsiina bezpeka [Nuclear and Radiation Safety], №4(100), 71-79. [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4\(100\).08](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4(100).08) (in Ukr.)

6. ANSYS, Inc. ANSYS Fluent User Guide. Version 19.1, ANSYS, Inc., 2019. Software manual.

Отримано 11.04.2024

Received 11.04.2024

Прийнято до друку 17.08.2024
Accepted for publication 17.08.2024