

УДК 697.93

**Чабан І. В.,** аспірант (Київський національний університет будівництва і архітектури)

### **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В УДАРНО-ПІННОМУ АПАРАТІ З БЛОКОМ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ**

**Проведено математичне моделювання процесів в ударно-пінному апараті з блоком термоелектричних модулів та здійснено порівняння даних фізичного експерименту та математичного моделювання в програмному комплексі ANSYS FLUENT 14.5.**

**Ключові слова:** математичне моделювання, ударно-пінний апарат, масо передача, теплопередача, модифікована k-ε модель турбулентності.

**Основною умовою,** що гарантує правильне зберігання музейних предметів і колекцій, є задовільний стан приміщень музею в цілому, інженерних систем, в тому числі систем забезпечення мікроклімату. На даний час оптимальні параметри мікроклімату, для зберігання та експонування музейних колекцій, як правило, створюють за допомогою як центральних, так і автономних систем кондиціонування з обладнанням для тепловологісної обробки повітря. Проте, крім виставкових залів в музеях, присутні майстерні, лабораторії, адміністративні, підсобні, технічні, науково-дослідні приміщення та фондосховища. У кожному з даних приміщень свої, особливі вимоги до параметрів мікроклімату, які потребують застосування автономних апаратів для здійснення процесів обробки повітря відповідно до специфіки кожного з приміщень. Разом з тим музеї займають приміщення зі складною структурою, де стандартні рішення систем мікроклімату рідко бувають ефективними [1].

На основі досліджень та аналізу існуючих систем та апаратів для створення мікроклімату в музейних приміщеннях, нами запропоновано новий вдосконалений комбінований компактний ударно-пінний апарат з блоком термоелектричних модулів. Апарат відноситься до поверхневих зрошувальних теплообмінних апаратів, які представляють собою поєднання контактної та поверхневого теплообмінника в одній конструкції. Конструктивні особливості апарату дозволяють забезпечувати та підтримувати оптимальні параметри мікроклімату в широких діапазонах, здатність видаляти забруднюючі речовини, бути легким, компактним, мобільним і незалежним від просторового розміщення [2].

Процеси в ударно-пінному апараті представляють складну задачу

для математичного моделювання, через сукупність процесів тепло та масообміну у турбулентному пінному шарі.

**Метою роботи** було математичне моделювання процесів гідроаеродинаміки та тепломасообміну в ударно-пінному апараті, зіставлення їх з даними фізичного експерименту та дослідження впливу конструктивних особливостей на гідроаеродинаміку та тепломасообмін в апараті.

На сьогодні існують обчислювальні комплекси, що здатні вирішувати найскладніші задачі гідро-, газодинаміки з врахуванням великої кількості ефектів та використання широкого набору математичних підходів. До них відносять – ANSYS CFX, FLUENT, Star-CD, LS-DYNA, ABAQUS, SolidWorks FlowVision, OpenFoam та ін.

Пакет ANSYS FLUENT призначений для моделювання складних течій рідин і газів з широким діапазоном зміни теплофізичних параметрів моделювання та використання багатосіткових методів з поліпшеною збіжністю, він дає оптимальну ефективність і точність рішення для широкого діапазону швидкісних режимів, використовує найбільш сучасні моделі для описання багатофазних потоків. Дані переваги дозволяють використовувати програмно-обчислювальний комплекс ANSYS FLUENT для моделювання процесів в ударно-пінному апараті.

Щоб описати потік газової та рідинної фази в апараті, була використана модель Ейлера розрахункового комплексу ANSYS FLUENT 14.5 для багатофазного потоку. Система розглядається, як неперервна з усередненим рівнянням переносу для кожної фази. Рух кожної фази регулюється відповідними рівняннями нерозривності, збереження імпульсу та енергії.

Багатофазна модель Ейлера дозволяє моделювати декілька взаємодіючих фаз, припускаючи, що кожна фаза веде себе як взаємнопроникне суцільне середовище. Об'ємні частки фаз описують регіон, який зайнятий одною фазою та використовують рівняння збереження маси та імпульсу

*Рівняння нерозривності* для газової та рідинної фаз має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_L \rho_L) + \nabla \cdot (\alpha_L \rho_L \mathbf{v}_L) = (m'_{gL} - m'_{Lg}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g) = (m'_{Lg} - m'_{gL}), \quad (2)$$

де  $\alpha_L, \alpha_g$  – об'ємна частка рідини та газу;  $\rho_L, \rho_g$  – густина рідини та

газу; і  $v_L, v_g$  – швидкість рідини та газу;  $m'_{gL}$  – характеризує масо передачу від фази  $g$  до фази  $L$ ;  $m'_{Lg}$  – характеризує масо передачу від фази  $L$  до фази  $g$ .

Об'ємні частки кожної з двох фаз мають відповідати наступній умові:

$$\alpha_L + \alpha_g = 1, \quad (3)$$

Рівняння збереження кількості руху:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_L \rho_L v_L) + \nabla \cdot (\alpha_L \rho_L v_L v_L) = \\ = -\alpha_L \nabla P + \nabla \bar{\tau}_L + \alpha_L \rho_L \bar{g} + \bar{R}_{Lg} + m'_{gL} \bar{v}_{gL} - m'_{Lg} \bar{v}_{Lg}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g v_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g v_g v_g) = \\ = -\alpha_g \nabla P + \nabla \bar{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \bar{g} + \bar{R}_{gL} + m'_{gL} \bar{v}_{gL} - m'_{Lg} \bar{v}_{Lg}, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $P$  – тиск загальний для всіх фаз,  $\bar{R}_{Lg}$  та  $\bar{R}_{gL}$  – члени рівнянь які представляють міжфазову передачу імпульсу для рідини та газу відповідно;  $\bar{v}_{gL}$  – інтерфазна швидкість, якщо  $m'_{gL} > 0$  (маса від фази переходить до фази  $L$ )  $\bar{v}_{pq} = \bar{v}_p$ , якщо  $m'_{gL} < 0$   $\bar{v}_{gL} = \bar{v}_g$ , якщо  $\bar{v}_{Lg} = \bar{v}_L$ , якщо  $m'_{Lg} < 0$   $\bar{v}_{Lg} = \bar{v}_g$ ;  $\bar{\tau}_q$  – напружено-деформований тензор, який для рідини та газу визначається як:

$$\bar{\tau}_L = (\alpha_L \mu_L) (\nabla \cdot \bar{v}_L + \nabla \cdot \bar{v}_L^T) + \alpha_L (\lambda_L - \frac{2}{3} \mu_L) \nabla \bar{v}_L \bar{I}, \quad (6)$$

$$\bar{\tau}_g = (\alpha_g \mu_g) (\nabla \cdot \bar{v}_g + \nabla \cdot \bar{v}_g^T) + \alpha_g \left( \lambda_g - \frac{2}{3} \mu_g \right) \nabla \bar{v}_g \bar{I}, \quad (7)$$

де  $\mu_L$ ,  $\mu_g$  і  $\lambda_L$ ,  $\lambda_g$  – динамічна і об'ємна в'язкість рідини та газу відповідно  $\bar{v}_q^T$  – транспонований інтеграл градієнту швидкості;  $\bar{I}$  – матриця тотожного перетворення.

Рівняння збереження енергії:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_L \rho_L h_L) + \nabla \cdot (\alpha_L v_L \rho_L h_L) = \\ & = -\alpha_L \frac{\partial P_L}{\partial t} \nabla + \bar{\tau}_L \nabla v_L + \nabla \bar{q}_q + (Q_{gL} + m'_{gL} h_{gL} - m'_{Lg} h_{Lgp}), \end{aligned} \quad (8)$$

де  $h_L$  – питома ентальпія рідкої фази;  $Q_{gL}$  – інтенсивність теплообміну між водою та повітрям;  $h_{gL}$  – міжфазова ентальпія. Теплообмін між фазами повинен відповідати балансу  $Q_{Lg} = -Q_{Lg}$  і  $Q_{gg} = 0$ .

Сила міжфазної взаємодії  $\vec{R}_{Lg}$ ,  $\vec{R}_{Lg}$  залежить від тертя, тиску, міжмолекулярного зв'язку та обмежена умовами  $\vec{R}_{Lg} = -\vec{R}_{gL}$ ,  $\vec{R}_{Lg} = -\vec{R}_{gL}$  і  $\vec{R}_{gg} = 0$ , де індекси  $g$  і  $L$  представляють рідку і газову фази. Член міжфазової взаємодії визначається за наступною формулою:

$$\vec{R}_{Lg} = K_{Lg} (\vec{v}_L - \vec{v}_g), \quad (9)$$

$K_{Lg}$  – коефіцієнт міжфазного обміну імпульсом, для газоповітряного потоку визначається через функцію тертя. Даний коефіцієнт показує який вплив має одна фаза на іншу. Другорядна газова фаза приймає форму бульбашок. Коефіцієнт обміну для бульбашкового потоку для газорідкої суміші в загальному вигляді виражається залежністю:

$$K_{pq} = \frac{\alpha_L \alpha_g \rho_g f}{\tau_g}, \quad (10)$$

де  $f$  – функція тертя;  $\tau_g$  – час релаксації частинок (бульбашок) визначається за формулою

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q}, \quad (11)$$

де  $d_p$  – дійсний діаметр бульбашок.

Нами була використана модель тертя Schiller-Naumann, яка в цілому є прийнятною для всіх багатofазних розрахунків [1]. Загальна форма для коефіцієнту міжфазного обміну

$$f = \frac{C_D Re}{24}. \quad (12)$$

Коефіцієнт тертя визначається, як

$$C_D = \begin{cases} \frac{24(1 + 0.15Re^{0.687})}{Re_b} & Re_b \leq 1000; \\ 0.44 & Re_b > 1000, \end{cases} \quad (13)$$

де  $Re$  – число Рейнольдса ( $Re_b$ ) віднесене до бульбашки визначається як

$$Re_b = \frac{\rho_L |\vec{v}_L - \vec{v}_g| d_b}{\mu_L}, \quad (14)$$

де  $\vec{U}_p, \vec{U}_q$  – різниця швидкостей двох фаз;  $\mu_L$  – динамічна в'язкість рідини.

#### Модель турбулентності

Щоб описати ефекти турбулентного коливання швидкості та скалярні величини, а також для адекватного моделювання процесів, що протікають в апараті, використана модель турбулентності для кожної фази (model for each phase). Головна фаза, рідина, є безперервною у всій розрахунковій області. Вторинна фаза, газ, безперервна на вході в апарат до моменту зіткнення з водою, у воді газова фаза диспергується на бульбашки і вийшовши з пінного шару знову представляє собою безперервну фазу.

Модифікована k-ε модель турбулентності (Realizable k-ε model) для кожної фази (for each phase) представляє собою модифіковану версію турбулентної кінетичної енергії та швидкості дисипації для обліку двох фаз.

Транспортні рівняння k та ε для модифікованої k-ε моделі турбулентності для рідини мають вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_L \rho_L k_L) + \nabla \cdot (\alpha_L \rho_L \vec{U}_L k_L) = & \nabla \cdot \left( \alpha_L \left( \mu_L + \frac{\mu_{t,L}}{\sigma_k} \right) \nabla k_L \right) + \\ & + (\alpha_L G_{g,L} - \alpha_L \rho_L \varepsilon_L) + K_{gL} (C_{gL} \cdot k_g - C_{Lg} \cdot k_L) - \\ & - K_{gL} (\vec{U}_g - \vec{U}_L) \cdot \frac{\mu_{t,g}}{\alpha_g \sigma_g} \nabla \alpha_g + K_{gL} (\vec{U}_g - \vec{U}_L) \cdot \frac{\mu_{t,L}}{\alpha_L \sigma_L} \nabla \alpha_L, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_L \rho_L \varepsilon_L) + \nabla \cdot (\alpha_L \rho_L \vec{U}_L \varepsilon_L) = \nabla \left( \alpha_L \left( \mu_L + \frac{\mu_{t,L}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon_L \right) - \\
 - C_{2\varepsilon} \alpha_L \rho_L \frac{\varepsilon_L}{k_L + \sqrt{v_{t,q} \varepsilon_L}} + C_{1\varepsilon} C_{3\varepsilon} \frac{\varepsilon_L}{k_L} \times \\
 \times [K_{gL} (C_{gL} \cdot k_g - C_{Lg} \cdot k_L) - K_{gL} (\vec{U}_g - \vec{U}_L) \times \frac{\mu_{t,g}}{\alpha_g \sigma_g} \nabla \alpha_g + \\
 + K_{gL} (\vec{U}_g - \vec{U}_L) \cdot \frac{\mu_{t,L}}{\alpha_L \sigma_L} \nabla \alpha_L],
 \end{aligned} \tag{16}$$

де  $\vec{U}_g, \vec{U}_L$  – середньозважена фазова швидкість;  $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$  – турбулентні числа Прандтля для  $k$  і  $\varepsilon$  відповідно;  $\mu_{t,L}$  – турбулентна кінетична в'язкість рідкої фази;  $G_{g,L}$  – генерація турбулентної кінетичної енергії;  $K_{gL}$  – міжфазова передача імпульсу;  $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, C_{gL}$  – константи моделі.

*Теплопередача в динамічному пінному шарі*

Внутрішня енергія для рідкої або газової фази записується через значення ентальпії даної фази:

$$h_{L(q)} = \int c_{p, L(q)} dT_{L(q)}, \tag{17}$$

де  $c_{p, L(q)}$  – питома теплоємність при сталому тиску рідини або газу;

$T_{L(q)}$  – температура рідини або газу.

Об'ємна витрата переданої енергії від однієї фази до іншої визначається як функція різниці температур:

$$Q_{gL} = a_{gL} (T_g - T_L), \tag{18}$$

де  $a_{gL}$  – об'ємний коефіцієнт теплопередачі між рідиною та газовою фазами. Коефіцієнт теплопередачі пов'язаний з числом Нусельта відношенням:

$$a_{gL} = \frac{\lambda_L Nu_g}{d_g} A_i, \tag{19}$$

де  $\lambda_L$  – теплопровідність фази;  $A_i$  – площа міжфазної поверхні,  $Nu_g$  – число Нусельта.

Площа міжфазової поверхні визначається як площа поверхні розділу між двома фазами на одиницю об'єму суміші. Даний параметр є важливим для визначення передачі маси, імпульсу і енергії через міжфазну поверхню. Нами використана симетрична модель для визначення міжфазної концентрації. В даній моделі введений додаткова об'ємна частка фази двохфазного потоку (первинний об'єм частки двофазного потоку), дана особливість забезпечує рівність нулю міжфазової концентрації при об'ємній частці рівній одиниці

$$A_i = \frac{6\alpha_g(1-\alpha_g)}{d_g}. \quad (20)$$

Число Нусельта визначається за наступною формулою

$$Nu_g = 2 + 0.6Re_g^{1/2} Pr^{1/3}, \quad (21)$$

де  $Re$  – відносне число Рейнольдса, що базується на діаметрі бульбашок газової фази та відносній швидкості,  $Pr$  – число Прандля:

$$Pr = \frac{c_{g_L} \mu_L}{k_L}. \quad (22)$$

Тепловий потік, від водоповітряного потоку до радіатора обчислюється за формулою:

$$q = h_{L(q)} (T_w - T_{L(q)}), \quad (23)$$

де  $h_{L(q)}$  – локальний коефіцієнт теплопередачі з боку газорідного потоку;  $T_w$  – температура поверхні стінки;  $T_{L(q)}$  – локальна температура газорідного середовища.

*Опис області розрахунку*

Нами була розроблена геометрична модель ударно-пінного рапарату (рис. 1) з розмірами 48,5×11,5×12 см за допомогою ANSYS Design modeler. В Mesh modeler сформована сітка методом CutCell з структурованих тетраедральних елементів. Щоб спростити тривимірну модель було прийняте припущення, що процеси в апараті відбуваються симетрично, узв'язку з даним припущенням розглядалась половина апарату.

*Граничні умови* задавались на вході, виході, стінках апарату та на зовнішній стінці радіатора. На вході задавалась об'ємна витрата повітря, температура та об'ємна частка рівна одиниці, на виході тиск рівний

атмосферному. Турбулентна кінетична енергія та швидкість дисипації задавались нульові, оскільки ефект турбулентності на вході і виході важко прогнозувати. Стіни описані з допомогою умови прилипання (no-slip) для газової і рідкої фаз. На зовнішній стінці радіатора задавалась температура поверхні стінки. На площині, що представляла вісь симетрії була задана гранична умова симетрії. Рівень води в апараті задавався за допомогою функції «patch», яка дозволяє задати об'ємну частку вторинної фази в апараті.

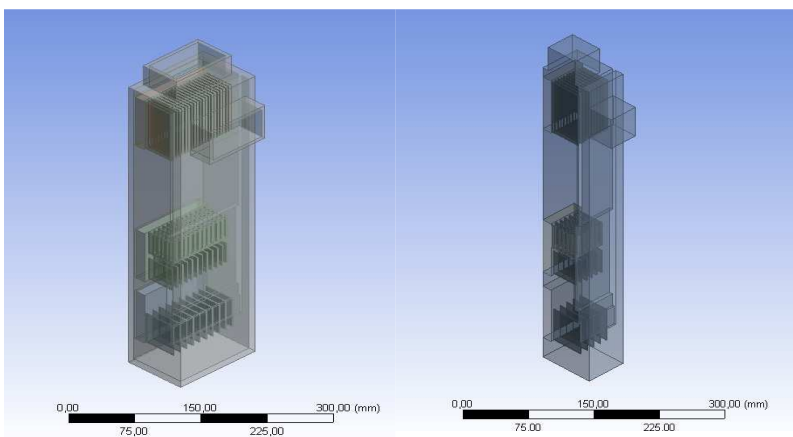


Рис. 1. Геометрична модель ударно-пінного апарату в Design modeler

#### *Метод чисельного рішення*

Комерційний пакет ANSYS FLUENT 14.5 базується на методі кінцевих об'ємів. Всі рівняння моделей вирішувались роздільним, ітераційним методом. Була розрахована нестационарна задача першого порядку в неявному формулюванні. Використана схема рішення заснована на матричному алгоритмі сумісного рішення основних рівнянь (phase coupled SIMPLE) методом корекції тиску (pressure-based solver), який використовує поєднання фаз напівнеявним методом для енергетичних рівнянь лінії зв'язку тиску зв'язаним алгоритмом тиск-швидкість [3]. Фактори релаксації для тиску, імпульсу і об'ємної частки були прийняті згідно рекомендацій: 0,3; 0,7 та 0,2 відповідно [4]. Схема дискредитації для імпульсу, об'ємної частки, турбулентної кінетичної енергії та швидкості дисипації турбулентної енергії була прийнята першого порядку. Розв'язок здійснювався з кроком по часу 0,001 – 0,01 в залежності від сходження та часу необхідного для взає-



модії в апараті.

*Результати моделювання*

Для визначення відповідності математичного моделювання фізичному експерименту, нами було здійснено порівняння результатів отриманих експериментально та в програмному комплексі ANSYS FLUENT. В таблицях 1-2 показано порівняння значень аеродинамічного опору апарату та його холодопродуктивності.

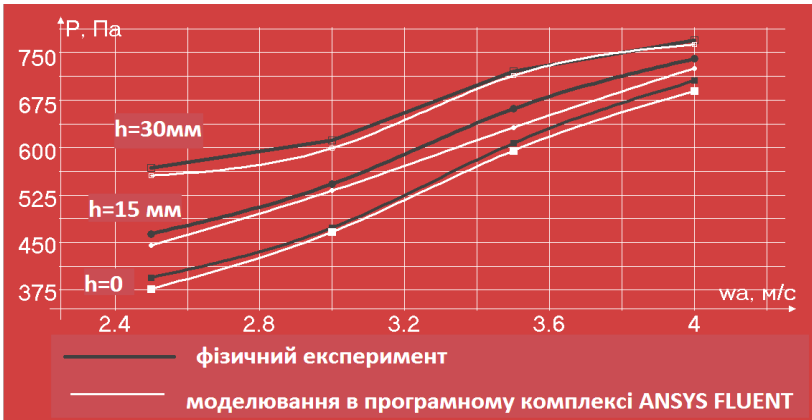


Рис. 2. Значення аеродинамічний опору апарату отриманого в ході експерименту та моделювання в програмному комплексі ANSYS FLUENT, при температурі повітря 22°C, атмосферному тиску 970 гПа

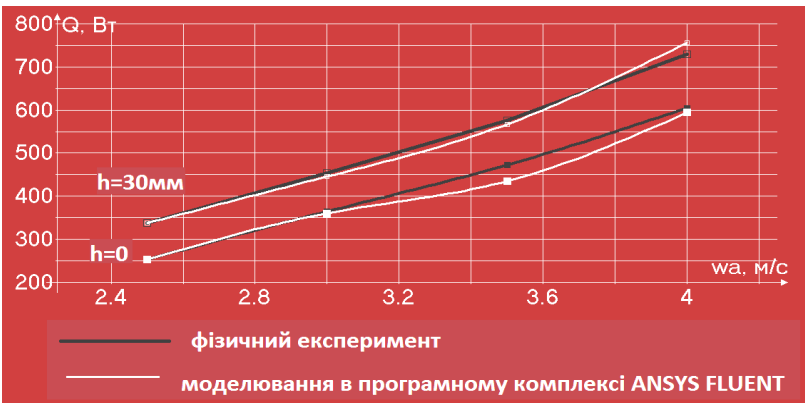


Рис. 3. Значення холодопродуктивності апарату, отримане експериментально та в програмному комплексі ANSYS FLUENT при температурі основи радіатора 15°C

Оскільки режим роботи апарату залежить від висоти початкового шару рідини та швидкості водоповітряної суміші, в перерізі апарату, нами було досліджено режими роботи апарату при швидкості повітря на вході в апарат 2-7 м/с та рівні рідини в апараті 10-30 мм. Щоб скласти картину перебігу процесів в апараті були отриманні профілі розподілу швидкостей повітря та води в перерізах апарату вектори швидкостей в характерних точках рис. 2-5.

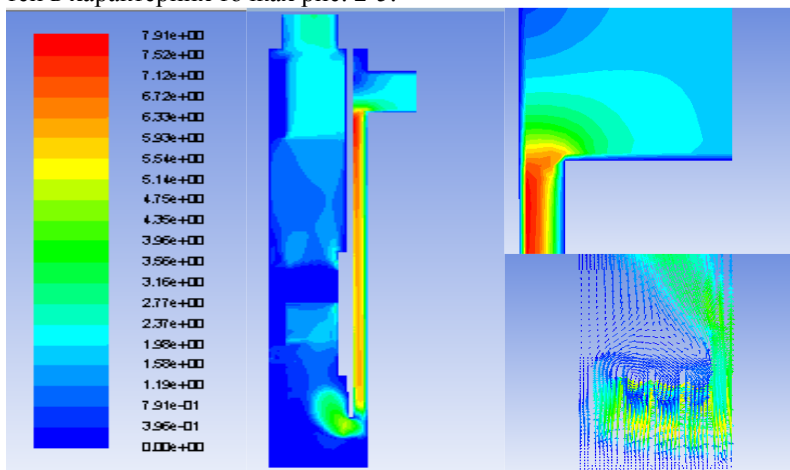


Рис. 3. Швидкість повітря в перерізі на осі симетрії апарату при швидкості повітря на вході 2 м/с

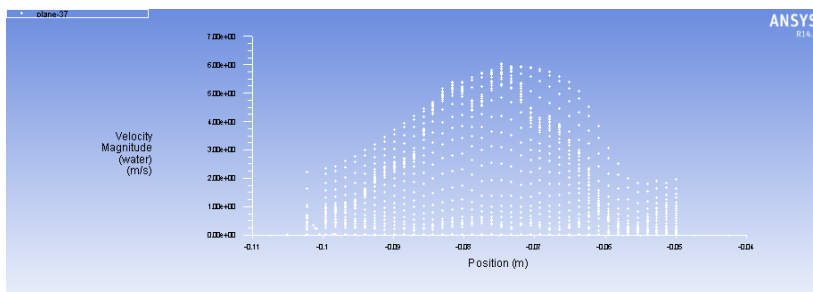


Рис. 4. Графік швидкості води в газоповітряному потоці в перерізі апарату на висоті 10 см від піддону апарату

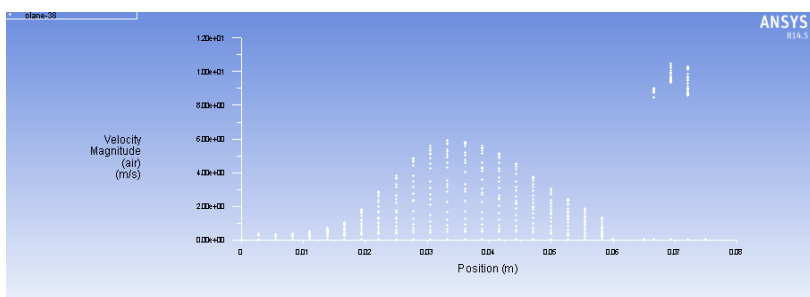


Рис. 5. Графік швидкості води в газоповітряному потоці в перерізі апарату на висоті 10 см від піддону апарату

Основний вплив на тепло масообмін в апараті має висота пінного шару, яка визначає активну частину поверхні теплообмінника. На рис.6-7 зображено рівні пінні в апараті взаємозалежні від швидкості повітря в перерізі апарату.

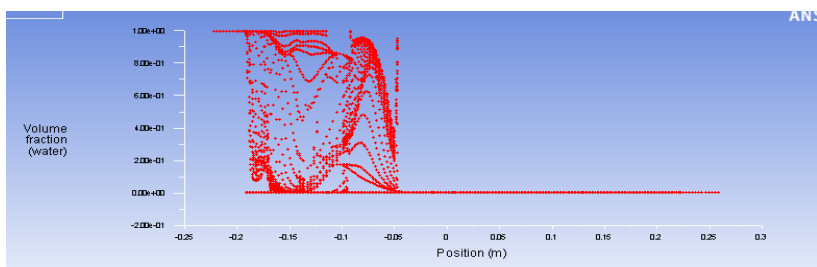


Рис. 6. Графік об'ємного вмісту води на осі симетрії апарату

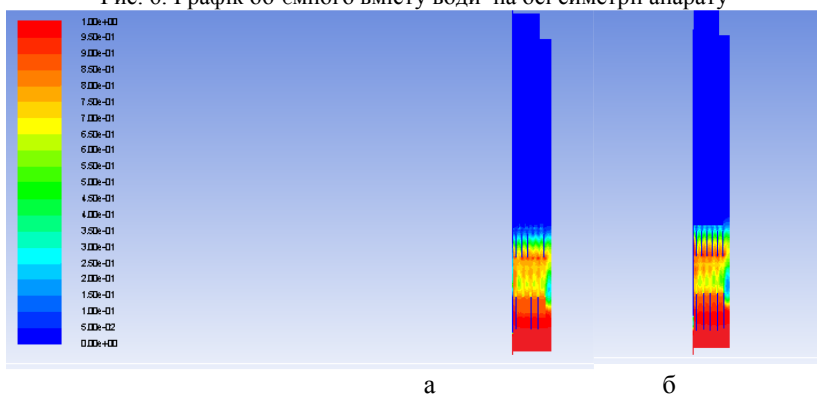


Рис. 7. Об'ємна доля рідини в газоповітряній суміші при початковому рівні рідини 10 мм а – швидкість повітря 2 м/с, б – 2,5 м/с

Внаслідок турбулізації рідини навколо ребер радіатора і частковому руйнуванню ламінарного пограничного шару рідини на поверхні радіатора значення коефіцієнта тепловіддачі від поверхні ребер до водоповітряного потоку зростає. Поле розподілу температур у пінному шарі та на ребрах радіатора показано на рис. 8.

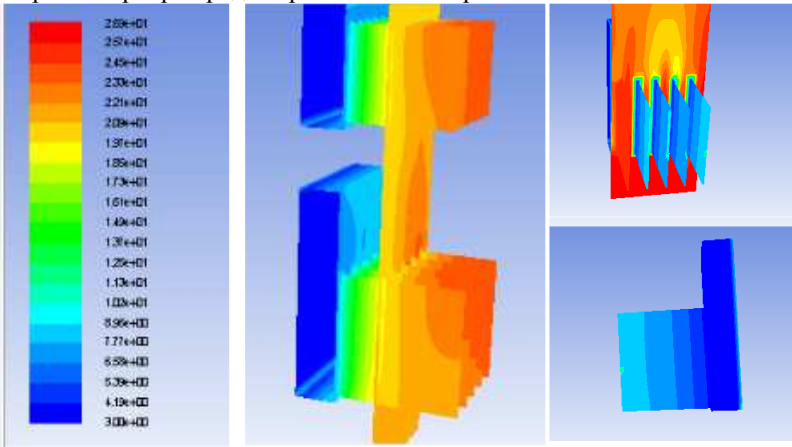


Рис. 8. Поле температур водоповітряного потоку, що омиває радіатор, та в самому радіаторі при швидкості повітря 2 м/с в перерізі апарату

### **Висновки.**

1. Дані отримані при математичному моделюванні апарату дозволяють дослідити особливості процесів гідраеродинаміки та теплома-сообміну в пінному шарі на границі рідина-газове середовище та на границі піна-теплообмінник.
2. Порівняння даних фізичного експерименту та математичного моде-лювання в програмному комплексі ANSYS FLUENT показали, що найбільше відносне відхилення склало  $\sigma=4,8\%$ .
3. Математичне моделювання дозволило виявити зони найбільшого аеродинамічного опору, найменших коефіцієнтів тепловіддачі та інші конструктивні недоліки апарату, що разом з вищевказаними висновками дозволяють продовжити напрямок подальших дослі-джень по вдосконаленню конструкції апарату.

1. «Рекомендації по проектуванню музеєв» / авт. нормативы Техничес-кие. – Москва : Стройиздат, 1988 р. 2. Компактные теплообменники / А. Кейс В. Лондон. – М.: Энергия, 1967. 3. Mergers and destruction of bubbles in

- bubbling / Prince M. and Blanch, H. // *AICHE Journal*, 36(10). – 1990. – P. 1485–1499. **4.** “A model for turbulent polydisperse two-phase flow in vertical channels,” / Politano M., Carrica, P., and Converti, J., // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2003. – № 29 : T. 7. – P. 1153 – 1182. **5.** “Applicability of the standard  $k - \epsilon$  turbulence model to gas-stirred baths,” / Schwarz M. and Turner, W., // *Applied Mathematical Modelling*. – 1988. – № 12 : T. 3. – P. 273–279. **6.** “Applicability of the standard  $k - \epsilon$  turbulence model to the dynamic simulation of bubble columns: Part I. Detailed numerical simulations,” / Sokolichin A. and Eigenberger, G., // *Chemical Engineering Science*. – 1999. – № 54. – P. 2273–2284. **7.** “CFD predictions for flow-regime transitions in bubble columns,” / Monahan S., Vitankar, V., and Fox, R., // *AICHE Journal*. – 2005. – № 51 : T. 7. – P. 1897–1923. **8.** “Computing the added mass of dispersed particles,” / Simcik M., Ruzicka, M., and Drahos, J. // *Chemical Engineering Science*. – 2008. – № 63 : T. 18. – P. 4580–4595. **9.** “Gas–liquid flow in bubble columns and loop reactors: Part I. Detailed modelling and numerical simulation,” 49(24, Part 2) / Sokolichin A. and Eigenberger, G., // *Chemical Engineering Science*. – 1994. – P. 5735 – 5746. **10.** “Modeling of isothermal bubbly flow with interfacial area transport equation and bubble number density approach,” / Sari S., Ergun, S., Barik, M., Kocar, C., and Sokmen, C. N. // *Annals of Nuclear Energy*. – 2009. – № 36 : T. 2. – P. 222–232. **11.** “Modelling of gas-liquid/gas-liquid solid flows in bubble columns: Experiments and CFD simulations,” / Rampure M., Buwa, V., and Ranade, V., // *Canadian Journal Of Chemical Engineering*. – 2003. – № 81 : T 3-4. – P. 692–706. **12.** “Momentum and heat transfer in” / Sato Y., Sadatomi, M., and Sekoguchi, K., // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1981. – № 2 : T. 7. – P. 167–177. **13.** “Phase distribution in bubble two-phase flow in vertical ducts,” / Lopez de Bertodano M., Lahey Jr, R. T., and Jones, O. C. // *International Journal of Multiphase*. – 1994. – № 20 : T. 5. – P. 805 – 818. **14.** “The modelling of buoyancy driven flow in bubble columns,” / Glover G. and Generalis, S., // *Chemical Engineering And Processing*. – 2004. – № 43 : T. 2. – P. 101–115. **15.** Computational Modeling And Simulations Of Hydrodynamics For Air-Water External Loop Airlift Reactors / Law D. // Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University. – 2010 p. **16.** Computational modeling of gasliquid flow in bubble columns. / Rafique M., Chen, P., Dudukovic, M. // *Reviews in Chemical Engineering*. – 2004. – № 20. – P. 225–375. **17.** Direct numerical simulations of dispersed flows. / Bunner B., Tryggvason, G., // *Proceedings of the Ninth Workshop on Two-Phase Flow Predictions, Germany*. – 1999. – P. 13–19. **18.** Modeling of bubble column / Jakobsen H. A., Lindborg H. and Dorao C. A. // *Industrial and Engineering Chemistry Resea*. – 2005. – № 14 : T. 44. – P. 5107–5151. **19.** Simulation of buoyancy driven bubbly flow: established simplifications and open questions. / Sokolichin A., Eigenberger G., Lapin A. // *AICHe Journal*. – 2004. – P. 50. – C. 24-45.

Рецензент: к.т.н., доцент Чабан В. Й. (НУВГП)

---

**Chaban I. V., Post-graduate Student** (Kyiv National University of Construction and Architecture)

### **MATHEMATIC SIMULATION OF PROCESSES IN SHOCK-FOAM UNIT WITH BLOCK OF THERMOELECTRIC MODULES**

The mathematical simulation of processes in shock-foam unit with the block of thermoelectric modules is carried out and comparison of physical experiment and mathematical simulation in software ANSYS FLUENT 14.5 is realized.

**Keywords:** mathematical simulation, shock-foam unit, mass transfer, heat transfer, realizable k- $\epsilon$  turbulence model.

---

**Чабан І. В., аспірант** (Київський національний університет будівництва та архітектури)

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В УДАРНО-ПЕННОМ АППАРАТЕ С БЛОКОМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ**

Проведено математическое моделирование процессов в ударно-пенном аппарате с блоком термоэлектрических модулей и реализовано сравнение данных физического эксперимента и математического моделирования в программном комплексе ANSYS FLUENT 14.5.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, ударно-пенный аппарат, массопередача, теплопередача, модифицированная k- $\epsilon$  модель турбулентности.

---