УДК 621.565

В.А. Смик[1] ***М.А. Козьміних***[1], ***Ю.В. Байдак***[2] ✉
[1] Одеська національна морська академія, вул. Дідріхсона, 8, Одеса, 65029, Україна
[2] Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна
✉ kozak_admin@ukr.net, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7594-0564

МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РОЗПОДІЛУ ПОВІТРЯ У ВІДСІКУ ВИПАРНИКА ХОЛОДИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ РЕФРИЖЕРАТОРНОГО КОНТЕЙНЕРА

Результати роботи стосуються холодильної установки рефрижераторного контейнера і спрямовані на розв'язання задачі розрахунку поля швидкості повітря на виході трубчатого випарника із вентилятором примусового обдування, який розташовано у металевому кожусі. Постановку задачі і її моделювання виконано для двомірної системі координат, а для її вирішення застосовано програмне середовище COMSOL Multiphysics, Femlab 3.0, Fluid Dynamics – Incompressible Navier-Stokes. Отримані результати дозволяють встановити межові умови при вирішенні задачі розрахунку поля швидкостей повітря у шафі рефрижераторного контейнера і, на їх основі, при розрахунку розподілу поля температур.
Ключові слова: *Моделювання; Рефрижераторний контейнер; Холодильна установка; Випарник; Примусова конвекція; Вектор швидкості.*

В.А. Смык[1], ***М.А. Козьминых***[1], ***Ю.В. Байдак***[2]
[1] Одесская национальная морская академия, ул. Дидрихсона, 8, Одесса, 65029, Украина
[2] Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, 65039, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА В ОТСЕКЕ ИСПАРИТЕЛЯ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ

Результаты работы касаются холодильной установки рефрижераторного контейнера и направлены на решение задачи расчета поля скорости воздуха на выходе трубчатого испарителя с вентилятором принудительного обдува, расположенного в металлическом кожухе. Постановку задачи и ее моделирование выполнено для двумерной системы координат, а для ее решения применена программная среда COMSOL Multiphysics, Femlab 3.0, Fluid Dynamics−- Incompressible Navier-Stokes. Полученные результаты позволяют установить предельные условия при решении задачи расчета поля скоростей воздуха в шкафу рефрижераторного контейнера и, на их основе, при расчете распределения поля температур.
Ключевые слова: *Моделирование; Рефрижераторный контейнер; Холодильная установка; Испаритель; Принудительная конвекция; Вектор скорости.*

DOI: 10.15673/0453-8307.4/2015.44786

I. ВСТУП

Щорічне виробництво швидкопсувних харчових продуктів у світі сягає 4 мільярдів тонн, з яких майже половина має малий термін зберігання, а відтак залежить від засобів і умов їх зберігання під час перевезень. Об'єми перевезень визначаються попитом споживчого ринку. Оскільки перевезення здійснюється упродовж тривалого часу і в умовах коливань температури оточуючого середовища в межах ±50ºС, суттєвої уваги отримують технічні засоби, які забезпечують зберігання їх якості – рефрижераторні контейнери.

Питання встановлення потрібної швидкості циркуляції повітря у корисному об'ємі рефрижераторного контейнера є дуже важливим, оскільки суттєво впливає не тільки на температуру, вологість збереження якості плодоовочевого вантажу під час його тривалого транспортування, але й на відведення шкідливої дії вуглекислоти, що виділяється з нього з часом і тим псує якість. Однаково це стосується збереження м'ясної і рибної продукції, оскільки її вивітрювання від надлишку швидкості повітря, утвореного примусовою циркуляцією вентилятора випарника, призводить до втрати вантажем ваги.

На рис.1 наведено зовнішній вигляд трубчастого випарника холодильної установки і його вентилятора примусової циркуляції повітря від виробника Carrier Transicold, що розташовані у металевому кожусі.

Моделювання явища переносу повітря конвекцією найчастіше здійснюють у двомірній постановці задачі. В умовах примусового руху повітря у корисному об'ємі рефрижераторного контейнера і, утворений під його впливом розподіл поля температур, визначається динамікою $T_{i,j} = f(\upsilon_{i,j}; \partial\upsilon_{i,j} / \partial\tau)$ течії речовини в якій $T_{i,j}$ – температура, $\upsilon_{i,j}$ – швидкість, τ – час; тиском – p тощо. Водночас теплофізична властивість повітря – в'язкість $\gamma = f(T_{i,j})$ впливає на поле швидкостей речовини, оскільки $(\upsilon_{i,j}; \partial\upsilon_{i,j} / \partial\tau) = f(\gamma)$. Відтак, вирішення задачі переносу тепла конвекцією зводиться до почергового (ітераційного) вирішення задач: визначення поля швидкостей речовини при незмінній її в'язкості $\gamma = const$; розрахунку поля температур речовини для отриманого поля швидкостей, та уточнення в'язкості. Вирішення задач повторюється в ітераційному циклі, за умови отримання збіжності результатів розрахунків, і завершується за показником відносної розбіжності значень температур, отриманих у попередній та наступній ітераціях.

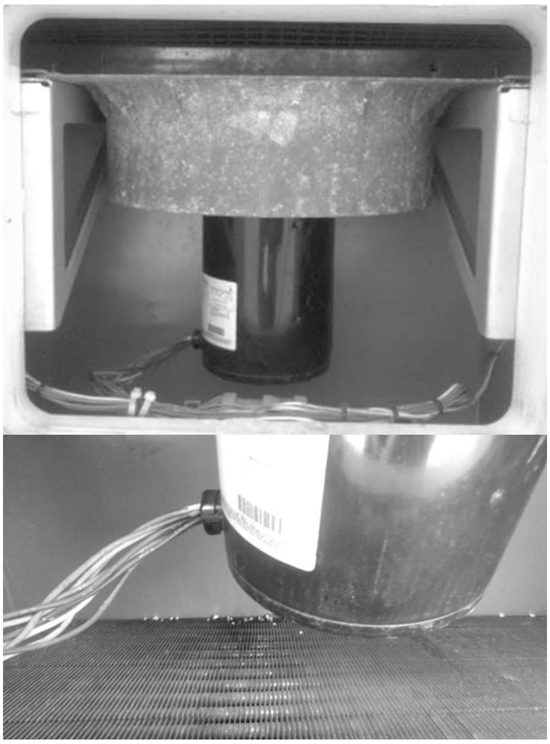

Рисунок 1 *– Зовнішній вигляд пристрою трубчастого випарника холодильної установки (унизу) із вентилятором від виробника Carrier Transicold*

Перенос тепла будь-якою рухомою речовиною визначається законами збереження її маси, кількості руху і енергії та має вид диференційних рівнянь, що пристосовані до елементарного об'єму середовища, крізь поверхню якого здійснюється рух. Вирішення складених диференційних рівнянь шляхом їх інтегрування надає можливість визначити обмін тепла конвекцією і, як правило, здійснюється варіаційними методами або чисельно – методом комірок, який застосовує перетворення диференційних рівнянь у матрицю алгебраїчних їх аналогів. Кожна утворена комірка повинна характеризуватися фізичними і функціональними властивостями речовини, мати певні розміри і бути пов'язаною з сусідніми комірками межовими умовами.

II. МАТЕМАТИЧНА ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАДАЧІ МОДЕЛЮВАННЯ І ЇЇ ЗМІСТ

Для отримання узагальненого рівняння руху конвекцією речовини із щільністю ρ, площею поверхні S, що обмежую визначений нерухомий об'єм V, розглянемо рівняння збереження її маси за малий проміжку часу $d\tau$ руху через поверхню і, за наявності, утворення додаткової маси внутрішнім джерелом, а саме у вигляді складової $\frac{d}{d\tau}\left(\int_V \rho dV\right)$.

Вважаючи, що перенос речовини здійснюється хаотичним рухом її молекул і, одночасно, рухом всієї речовини конвекцією, оцінимо перенос молекул за щільністю $\vec{J}_\rho$ спрямованої по нормалі $\vec{n}$ до ізоконцентраційної поверхні S елементарного об'єму V, а конвекцію – за щільністю потоку речовини конвекцією $\vec{\upsilon}\rho$ де $\vec{\upsilon}(u,v)$– лінійна швидкість речовини у двох координатах. Відтак, крізь елементарну поверхню dS об'єму елементарного dV обома видами переносу маси речовини здійснюється її витік обсягом $\left[-\int_S \vec{J}_\rho \cdot \vec{n} dS - \int_S \rho(\vec{\upsilon}\cdot\vec{n})dS\right]$. У разі наявності внутрішнього джерела речовини, до об'єму надходить її кількість обсягом $\int_V I_\rho dV$, де I_ρ – потужність джерела речовини. Здійснивши перехід від поверхневих інтегралів до інтегралів за об'ємом (теорема Остроградського-Гауса) і скориставшись законом збереження маси речовини в об'ємі, отримаємо рівняння балансу у вигляді виразу

$$\frac{d}{d\tau}\int_V \rho dV = -\int_V \nabla\cdot(\rho\vec{\upsilon})dV - \int_V \nabla\cdot\vec{J}_\rho dV + \int_V I_\rho dV,$$

в якому, при двохмірній постановці задачі і у прямокутній системі координат, вектор градієнту $\nabla = \vec{i}\frac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial}{\partial y}$, а відтак $\nabla\cdot\vec{\upsilon}$ – є дивергенцією швидкості. Оскільки інтегрування здійснюється по спільному об'єму, матимемо

$$\int\limits_V \left(\frac{d\rho}{d\tau} + \nabla \cdot (\rho\vec{\upsilon}) + \nabla \cdot \vec{J}_\rho - I_\rho \right) dV = 0$$

з якого витікає, що

$$\frac{d\rho}{d\tau} + \nabla \cdot (\rho\vec{\upsilon}) = -\nabla \cdot \vec{J}_\rho + I_\rho \cdot \qquad (1)$$

Рівняння балансу маси речовини свідчить, що у випадку нехтуванням рухом її молекул $\vec{J}_\rho = 0$ і наявністю внутрішнього джерела речовини $I_\rho = 0$, воно спрощується до виразу $\frac{d\rho}{d\tau} + \nabla \cdot (\rho\vec{\upsilon}) = 0 \cdot$ Якщо ж розглядати сталий режим переносу маси конвекцією, локальна похідна $\frac{d\rho}{d\tau} = 0$, матимемо $\nabla \cdot (\rho\vec{\upsilon}) = 0$ або у двомірній постановці задачі

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \cdot$$

До того ж, якщо речовина не стискається, наприклад вода, то $\rho = const$ і матимемо його у вигляді $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$, який є адекватним для переносу речовини при незначних змінах її температури і тиску.

Як витікає з вищенаведеного, для урахування руху маси речовини потрібно знати її швидкість, а, відтак, наступним етапом формалізації задачі руху однокомпонентної речовини є вирішення диференційного рівняння переносу імпульсу сили - κ або кількості руху. Диференційне рівняння переносу імпульсу сили отримують з виразу (1), якщо масу або щільність речовини, що переноситься пов'язати із кількістю її руху (імпульсом сили) віднесеного до одиниці об'єму, на підставі другого закону Ньютона

$$m\vec{a} = m\frac{d\vec{\upsilon}}{d\tau} = \frac{d(m\vec{\upsilon})}{d\tau} = \frac{d\vec{\kappa}}{d\tau} = \vec{F} \cdot$$

Із урахуванням того, що градієнт щільності речовини є пропорційним (розбіжності) дивергенції швидкості $\vec{\rho} \equiv \rho\vec{\upsilon}$, діючій на елементарний об'єм силі буде відповідати загальна зміна кількості руху в самому об'ємі. Отже, швидкість зміни імпульсу сили визначиться сумою: поверхневого інтегралу від щільності потоку імпульсу, що переноситься конвекцією речовини крізь межі визначеного елементарного об'єму; поверхневого інтегралу від тензора механічних напруг (задача Коші) – нормальних та дотичних, що припадають на три ортогональні площини об'єму і обумовлені вектором масового зусилля $\vec{F}_{i,j}$, діючого на одиницю маси речовини, тобто як $\overline{\overline{\sigma}}_{i,i} = d\overline{F}_{i,j} \big/ dS_i$, та об'ємного інтегралу від повного вектору масової гравітаційної сили. Поверхневим силам, які виникають під дією сусідніх елементарних об'ємів з речовиною, відповідають напруги, що діють на шість межових поверхонь визначеного кубічного об'єму.

Таким чином, вираз (1) щодо переносу кількості руху речовини отримає вигляд

$$\frac{d(\rho\vec{\upsilon})}{d\tau} + \nabla \cdot (\rho\vec{\upsilon}\vec{\upsilon}) = -\nabla \cdot \overline{\overline{\sigma}} + \rho\vec{F}$$

в якому $\vec{J}_\rho = \overline{\overline{\sigma}}$, а $I_\rho = \rho\vec{F}$.

Виконуючи заміну тензора напруг $\overline{\overline{\sigma}}$ сумою кульового тензора, пов'язаного зі зміною елементарного об'єму під термодинамічним тиском речовини p і девіатора напруг (тензора в'язких напруг), пов'язаного зі зміною форми елементарного об'єму внаслідок його деформацій під впливом зміни в'язкості речовини γ, отже її течії, тобто у вигляді $\overline{\overline{\sigma}} = p\overline{\overline{\delta}} + \overline{\overline{\gamma}}$, отримаємо диференційне рівняння переносу імпульсу сили у вигляді

$$\frac{d(\rho\vec{\upsilon})}{d\tau} + \nabla \cdot (\rho\vec{\upsilon}\vec{\upsilon}) = -\nabla p - \nabla \cdot \overline{\overline{\gamma}} + \rho\vec{F}, \qquad (2)$$

в якому $\overline{\overline{\delta}} = 1$ – дельта-тензор Кронекера (сума двох змінних – одинична діагональна і розріджена матриця). Ліва частина виразу є сумою локальної зміни кількості руху у часі та за рахунок переносу тепла конвекцією. Права частина враховує зміну кількості руху під впливом зміни тиску, внутрішнього тертя від зміни в'язкості речовини та дію зовнішніх сил (гравітаційної у випадку, що розглядається).

Рівняння (2) не є самодостатнім для вирішення, оскільки має дві шукані величини – вектор швидкості речовини $\vec{\upsilon}$ і тензор напруг або щільність молекулярного потоку, яка враховується в'язкістю γ.

При розгляді ізотропних речовин із лінійним законом переносу імпульсу сили, для зменшення кількості невідомих в диференційному рівнянні застосовують реологічне рівняння, яке встановлює залежність між девіатором напруг (тензором в'язких напруг) $\nabla \cdot \overline{\overline{\gamma}}$ і тензором швидкостей деформацій $\nabla \cdot (\rho\vec{\upsilon} \cdot \vec{\upsilon})$. У реологічному рівнянні течії в'язкої ізотропної рідини тензор напруг розглядають у вигляді суми двох складових – ізотропної і неізотропної та при їх співвідношенні у виразі як одна до двох третин

$$\overline{\overline{\sigma}} = \left[p - \varphi(\nabla \cdot \vec{\upsilon}) \right] \overline{\overline{\delta}} + \overline{\overline{\gamma}}$$

і в якому φ – об'ємна в'язкість речовини, якою зазвичай нехтують внаслідок малих значень. При ламінарній течії речовини її в'язкість пов'язують із швидкістю за законом Ньютона у вигляді $\gamma = -\eta \frac{\partial \upsilon}{\partial n}$, в якому η – динамічна в'язкість речовини; υ – швидкість речовини в напрямку руху; n – нормаль до напрямку швидкості. Для загального випадку реологічне рівняння використовують у вигляді

$$\bar{\bar{\gamma}} = -\eta\left[\nabla\cdot\vec{\upsilon} + \left(\nabla\cdot\vec{\upsilon}\right)^{T}\right] + \frac{2}{3}\eta\left(\nabla\cdot\vec{\upsilon}\right)\bar{\bar{\delta}} \ ,$$

де $\left(\nabla\cdot\vec{\upsilon}\right)^{T}$ – тензор, спряжений від тензора $\nabla\cdot\vec{\upsilon}$ (транспонована матриця).

Із урахуванням останнього, диференційне рівняння Нав'є - Стокса, яке витікає із рівняння переносу імпульсу сили (2), отримує вигляд

$$\frac{d(\rho\vec{\upsilon})}{d\tau} + \nabla\cdot(\rho\vec{\upsilon}\vec{\upsilon}) = -\nabla p + \\ +\nabla\cdot\left\{\eta\left[\nabla\cdot\vec{\upsilon} + \left(\nabla\cdot\vec{\upsilon}\right)^{T}\right]\right\} - \nabla\frac{2}{3}\eta\left(\nabla\cdot\vec{\upsilon}\right) + \rho\vec{F} \ .$$

У випадку нестискуваної речовини, її щільність – $\rho = const$, дивергенція швидкості $\nabla\cdot\vec{\upsilon} = 0$, а отже рівняння спрощується до виду

$$\frac{d(\rho\vec{\upsilon})}{d\tau} + \nabla\cdot(\rho\vec{\upsilon}\vec{\upsilon}) = -\nabla p + \\ +\nabla\cdot\left\{\eta\left[\nabla\cdot\vec{\upsilon} + \left(\nabla\cdot\vec{\upsilon}\right)^{T}\right]\right\} + \rho\vec{F}, \qquad (3)$$

а в умовах розглядання сталого процесу переміщення речовини, для якого локальна похідна $\frac{d\upsilon}{d\tau} = 0$, матимемо

$$\nabla\cdot(\rho\vec{\upsilon}\cdot\vec{\upsilon}) = -\nabla\cdot p + \nabla\cdot\left\{\eta\left[\nabla\cdot\vec{\upsilon} + \left(\nabla\cdot\vec{\upsilon}\right)^{T}\right]\right\} + \rho\vec{F}$$

або як

$$\rho(\nabla\cdot\vec{\upsilon})\vec{\upsilon} = \nabla\cdot\left[-p + \eta\left(\nabla\cdot\vec{\upsilon} + (\nabla\cdot\vec{\upsilon})^{T}\right]\right] + \rho\vec{F} \ . \qquad (4)$$

Динамічна в'язкість η, що входить до складу рівняння Нав'є - Стокса у випадку ізотермічного потоку є незмінною величиною. У загальному випадку – залежить від температури і складу речовини. Взагалі, у фізиці, векторне рівняння Нав'є - Стокса є системою трьох скалярних рівнянь з шуканими трьома величинами швидкості і тиску. Отже, для вирішення задачі використовують додаткове – четверте рівняння закону збереження маси – рівняння не розірваності, яке у випадку речовини, що не стискається має вид $\nabla\cdot\vec{\upsilon} = 0$. У якості початкових умов застосовують рівняння $\vec{\upsilon}(\vec{x}) = \vec{\upsilon}^{0}(\vec{x})$ в якому $\vec{\upsilon}^{0}(\vec{x})$ задана гладка вектор-функція, яка задовольняє рівнянню нерозірваності $\nabla\cdot\vec{\upsilon}^{0} = 0$.

III. МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РОЗПОДІЛУ ПОВІТРЯ У ВІДСІКУ ВИПАРНИКА

Під моделюванням вважатимемо застосування методу чисельного дослідження фізичного явища руху повітря у визначеному геометричному об'ємі і накладених на нього межових умовах та на підставі його диференційних рівнянь балансу маси, імпульсу сили.

Метою роботи є визначення межових значень швидкості і тиску повітря на виході після випарника холодильної машини рефрижераторного контейнера та такого, який, розташовано у металевому кожусі із звуженням перерізу вихідного отвору і оснащено системою примусової подачі повітря від вентилятора, що приводиться у дію двохшвидкісним однофазним асинхронним двигуном. Із наведеного на рис.1 пристрою випарника витікає, що повітря під дією примусової конвекції, утворюваної вентилятором, обтікає встановлену під кутом до напрямку руху повітря поверхню випарника і проходить у каналі звуження (прискорювача), де його швидкість і тиск зростають. Отже, швидкість руху повітря у корисному об'ємі холодильної шафи рефрижераторного контейнера із об'єктами тимчасового утримання, є залежними від початкових значень швидкості повітря і його тиску на виході випарника, а також від продуктивності двигуна вентилятора. До того ж розподіл поля температур у холодильній шафі також визначається із урахуванням поля швидкостей повітря. Для розрахунку межових значень швидкості і тиску повітря на виході

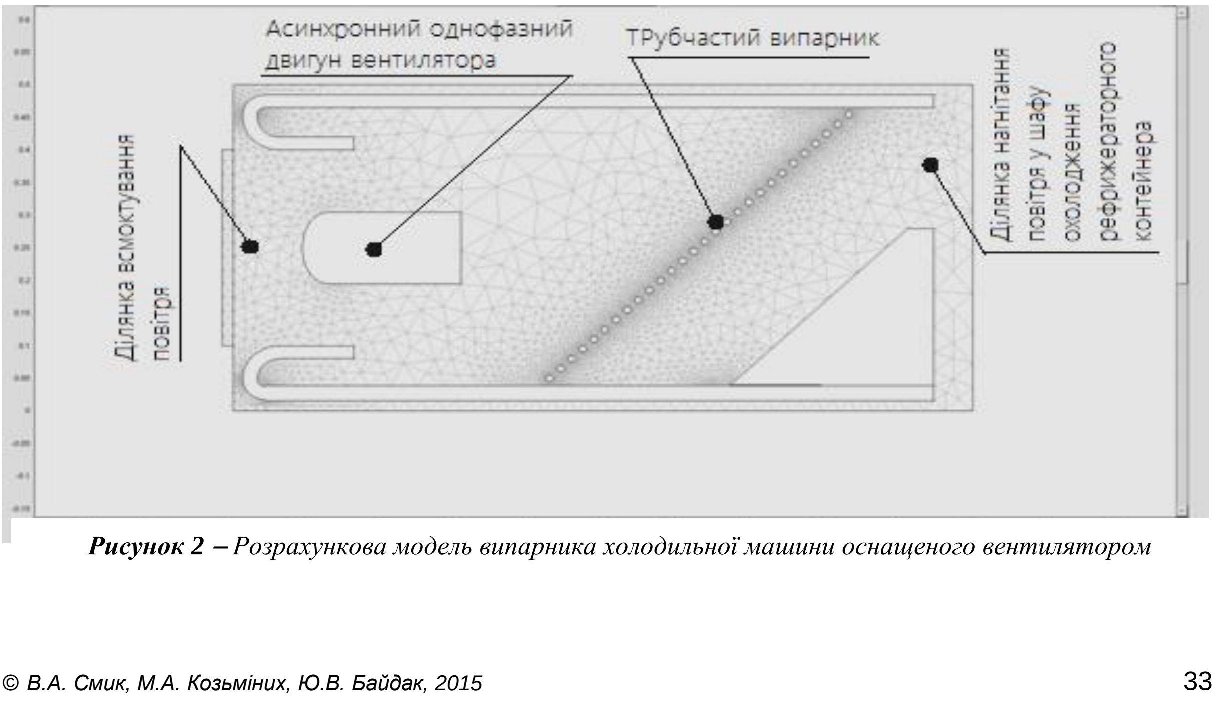

***Рисунок 2** – Розрахункова модель випарника холодильної машини оснащеного вентилятором*

після пристрою випарника холодильної машини рефрижераторного контейнера застосовано програмне забезпечення COMSOL Multiphysics Femlab 3.0 в його частині Fluid Dynamics – Incompressible Navier-Stokes.

При розрахунку механіки повітря у динаміці або статиці припускаємо, що його щільність є незмінною чи майже незмінно. У підсумку матимемо нестисливий потік, який припускає застосування рівнянь Нав'є - Стокса.

Змінні і розмірність моделі. Вирішення рівнянь Нав'є - Стокса дозволяє визначити тиск і складові вектора швидкості повітря у просторі геометричних розмірів моделі за рівнянням його потоку (4) в якому: $\eta = 2.56e-5(kg/ms)$ – динамічна в'язкість, яка встановлює зв'язок між зсувними напругами в повітрі до швидкості зсуву; $\rho = 0.66(kg/m^3)$ – щільність, як властивість повітря; $\vec{\upsilon}$ – вектор поля швидкості або його складові по осях, які залежать від розмірів геометричної моделі; $p(Pa)$ – тиск; F – масове зусилля, яке визначає розподіл силового поля – гравітаційного [1,2].

Моделювання задачі починається з формування межових умов однозначності: геометричних, якими задається форма і розміри об'єкту в якому здійснюється процес; фізичних, якими встановлюються такі теплофізичні параметри середовища як щільність, в'язкість; крайових, якими встановлюються початкові значення швидкості, тиску на окремих межах або у середовищі. В задачі, що вирішується застосовані межові умови першого і другого роду. Загальний вигляд геометрії області розрахунку в якому диференційне рівняння Нав'є - Стокса дозволяє визначити поле швидкості у будь-якій точці, є поділеним на елементарні комірки в яких диференційне рівняння замінено його кінцево-різнисним аналогом (алгебраїчним рівнянням), рис.2, та таким в якому враховані геометричні розміри комірки та фізичні властивості їх середовища. Отже алгебраізація рівняння утворює замість одного рівняння Нав'є - Стокса матрицю рівнянь, розмір якої у двомірній постановці задачі дорівнює кількості комірок у квадраті.

На рис.3 наведено результати розрахунку поля швидкостей повітря, що обтікає зовнішню поверхню випарника холодильної установки встановлену по відношенню до вентилятора примусової конвекції під кутом 45°.

На рис.4, 5, 6 наведені графіки розподілу швидкості повітря до, вздовж і після проходження ним випарника, розташованого під кутом 45° до вісі вентилятора, отримані шляхом моделювання в програмному середовищі Femlab 3.0, а саме в Fluid Dynamics - Incompressible Navier-Stokes.

Із урахуванням мети роботи – визначити межові умови на виході з випарника, на рис.8 наведено графік швидкості повітря, що подається до входу у шафу охолодження рефрижераторного контейнера і залежить від умов зміни продуктивності вентилятора та температури зовнішнього середовища.

На рис.9 наведено графік зміни тиску повітря, який під дією примусової конвекції вентилятора, обтікає трубки випарника з хладоном проходячи крізь отвори. Графік зміни тиску побудовано по нормалі до поверхні випарника

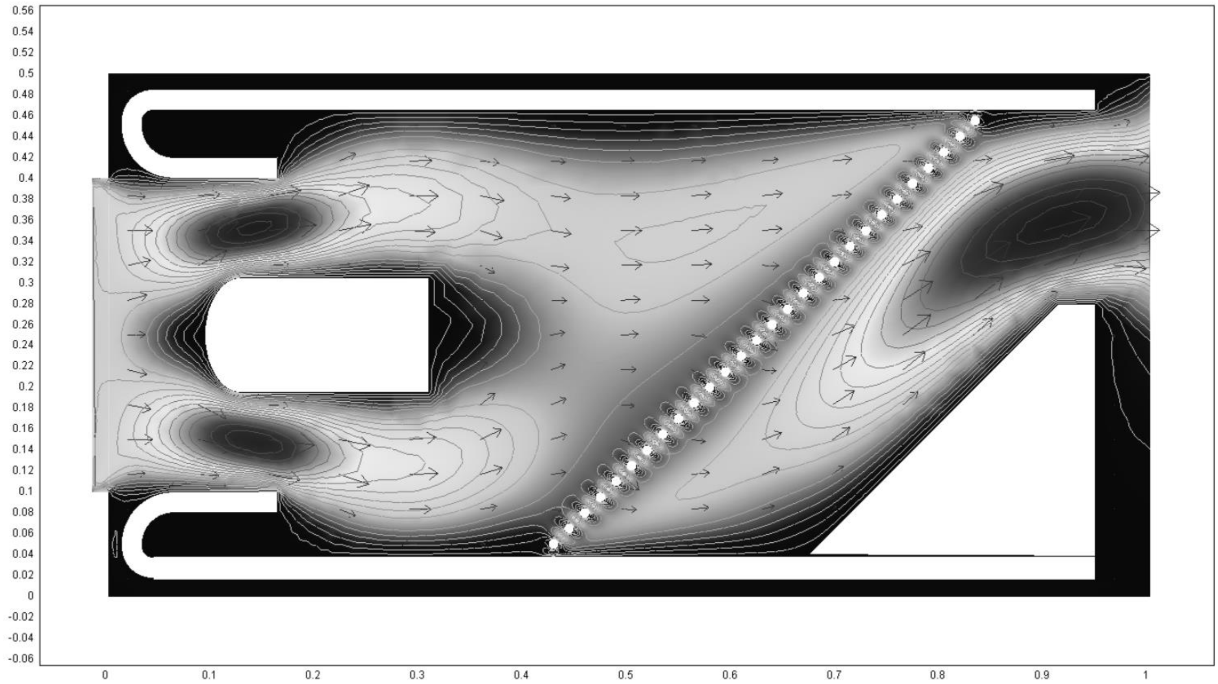

***Рисунок 3** – Результати розрахунку поля швидкості повітря у пристрої трубчастого випарника холодильної установки із вентилятором*

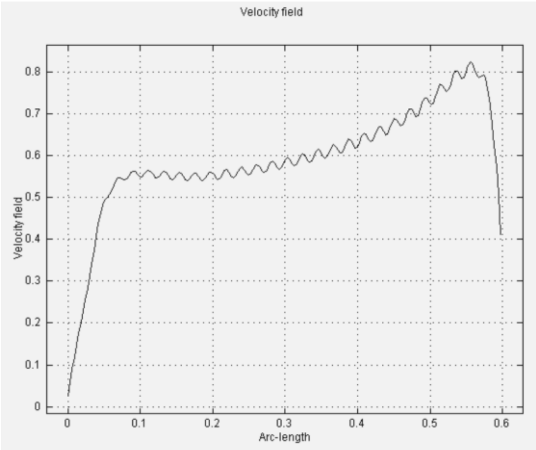

***Рисунок 4** – Графіки зміни швидкості повітря до проходження ним випарника*

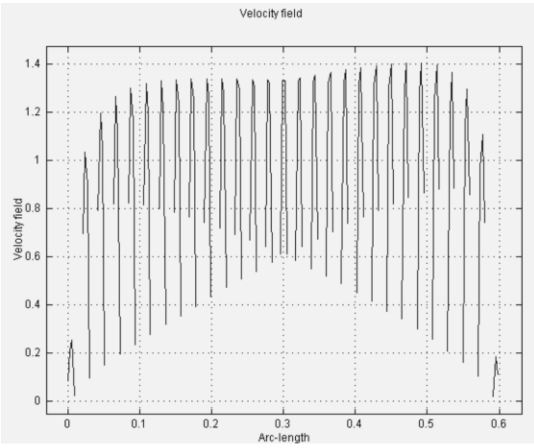

***Рисунок 5** – Графіки зміни швидкості повітря вздовж перерізу трубок випарника*

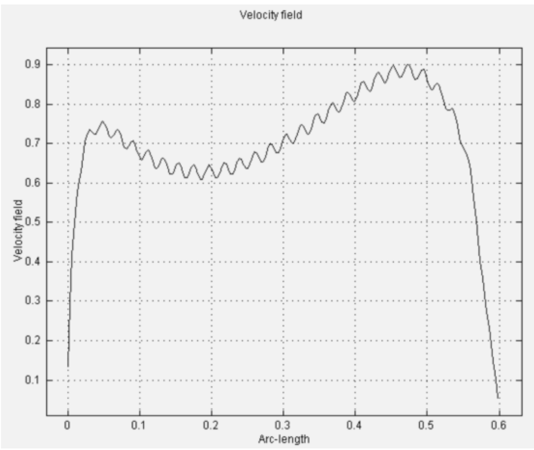

***Рисунок 6** – Графіки зміни швидкості повітря після проходження ним випарника*

На рис.7 наведено аналогічний графік швидкості повітря на ділянці всмоктування його до випарника вентилятором.

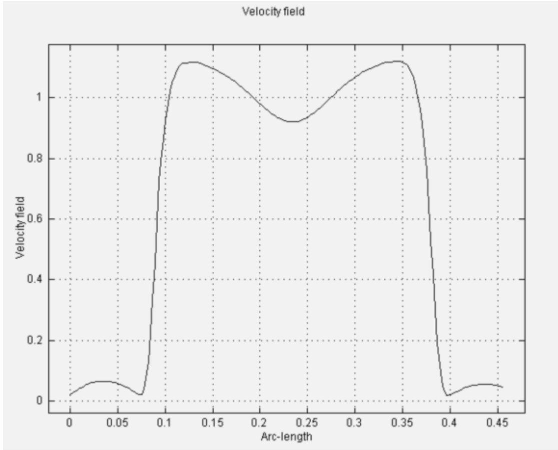

***Рисунок 7** – Графік зміни швидкості повітря на виході з шафи охолодження і вході до випарника*

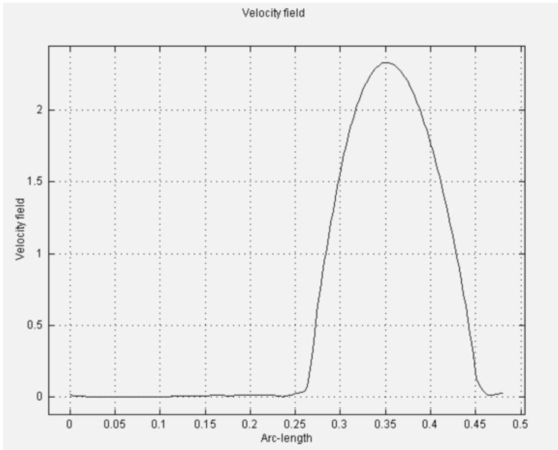

***Рисунок 8** – Графік зміни швидкості повітря на виході з випарника і вході до шафи охолодження рефрижераторного контейнера*

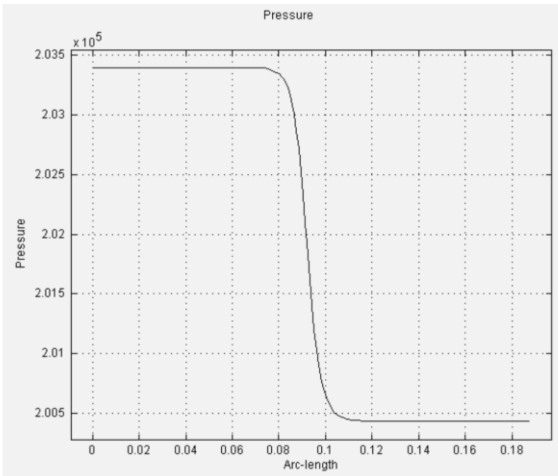

***Рисунок 9** – Графік зміни тиску по нормалі до поверхні випарника*

IV. ВИСНОВКИ

1. Реалізована у програмному середовищі Femlab 3.0 задача з розрахунку вектора поля швидкості може бути застосована для встановлення початкових умов щодо розрахунку поля вектора швидкості у об'ємі шафи охолодження рефрижераторного контейнера і, на їх підставі, поля температур.

2. Наведено, що вектор швидкості повітря на вході до шафи охолодження рефрижераторного контейнера нерівномірний вздовж межі та має характер параболи, що є важливим при моделюванні поля швидкості у самому рефрижераторі.

3. Результати моделювання поля швидкості повітря на виході з пристрою випарника дозволяють більш ретельно підійти до вибору типу, потужності, ефективної продуктивності асинхронного електродвигуна приводу його вентилятора та у залежності від побудови повітряного кожуху і вибору форми вихідного сопла.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Беляев Н. М.** Основы теплопередачи: Учебник.- К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989.- 343 с.: ил.

2. **Gresho, P.M, and Sani, R.L.** Incompressible Flow and the Finite Element Method, Volume 1 & 2, John Wiley & Sons, New York, 2000.

3. **Pironneau,O.,** Finite Element Methods for Fluids, John Wiley & Sons, 1989.

4. **Rose, Alan, and Simpson, Ben:** Laminar, Constant-Temperature Flow Over a Backward Facing Step, 1st NAFEMS Workbook of CFD Examples. Glasgow, UK, 2000.

Отримана в редакції 10.03.2015, прийнята до друку 03.07.2015

V.A. Smyk[1], ***M.A. Kozminykh***[1], ***Yu.V. Baidak***[2] ✉
[1] Odessa National Maritime Academy, 8 Didrikhson str., Odessa, 65029, Ukraine
[2] Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatnaya str., Odessa, 65082, Ukraine
✉ kozak_admin@ukr.net, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7594-0564

SIMULATION OF AIR DISTRIBUTION RATE IN REFRIGERATING CONTAINER REFRIGERATION UNIT EVAPORATOR COMPARTMENT

The study is aimed at solving the problem of convective heat transfer calculating in the tubular evaporator unit of refrigerating container, which is equipped with fan forced convection. The mathematical model of the problem as a differential equation that establishes the energy conservation law in the air cells through the surface of which its movement is carried out is given. Inthe process of the convective heat transfer around the evaporator problem calculating the link between the basic physical quantities in the air − temperature fields and velocity of its movement was considered. Close relationship of obtained temperature values and air velocity at the outlet from evaporator unit as boundary conditions for further calculation of temperature field in the refrigerator compartment of refrigerating container was proved. Statement of the problem and its simulation wereperformed in a two-dimensional coordinate system, and software environment COMSOL Multiphysics, Femlab 3.0, Fluid Dynamics - Incompressible Navier-Stokes - Convection and Conduction was applied for its solution. The accomplished calculations have shown that the integral temperature value at the outlet of the evaporator unit, was calculated taking into account air velocity, which is lower than its values obtained without air movement consideration. The results of the study should be useful during the research of the convective heat transfer phenomenon in the different refrigerating devices, allow to choose evaporator and fan capacity morereasonably under conditions of obtaining the desired cooling mode for perishable products as well asin the learning process.

Key words: *Simulation; Refrigerating container; Refrigeration unit; Evaporator; Forced convection; Rate vector*

REFERENCES

1. **Belyaev N.M.** 1989. Osnovy teploperedachi: Uchebnik. *Kyiv.: Vyscha shkola. Golovnoe izd-vo,* 343 p. (in Russian)

2**. Gresho, P.M, and Sani, R.L.** 2000. Incompressible Flow and the Finite Element Method, Volume 1 & 2, John Wiley & Sons, New York.

3. **Pironneau, O.** 1989. Finite Element Methods for Fluids, Chichester etc., John Wiley & Sons, Paris etc., Masson 1989. 208 pp. ISBN 0-471-92255-2

4. **Rose, Alan, and Simpson, Ben.** 2000. Laminar, Constant-Temperature Flow Over a Backward Facing Step. 1st NAFEMS Workbook of CFD Examples. Glasgow, UK.

Received 10 March 2015
Approved 03 July 2015
Available in Internet 30.08.2015