

УДК 621.565

Моделювання швидкості розподілу повітря у відсіку випарника холодильної установки рефрижераторного контейнера

Ю. В. Байдак¹⁾, М. А. Козьмініх²⁾, В. А. Смик³⁾¹⁾ Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039^{2), 3)} Одеська національна морська академія, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна, 65029**Article info:**

Paper received:

13 March 2015

The final version of the paper received:

06 June 2015

Paper accepted online:

30 November 2015

Correspondent Author's Address:¹⁾ kozak_admin@ukr.net²⁾ trunonma@gmail.com³⁾ smyk2007@ukr.net

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, що розміщений у металевому кожусі. Постановку задачі і її моделювання виконано для двовимірної системи координат, а для її розв'язання застосовано програмне середовище COMSOL Multiphysics, Femlab 3.0, Fluid Dynamics - Incompressible Navier-Stokes. Одержані результати дозволяють установити межові умови під час розв'язання 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.

ВСТУП

Щорічне виробництво швидкопсувних харчових продуктів у світі сягає 4 мільярдів тонн, з яких майже половина з малим терміном зберігання, а відтак залежить від засобів та умов їх зберігання під час перевезень. Обсяги перевезень визначаються попитом споживчого ринку. Оскільки перевезення здійснюються впродовж тривалого часу і за умов коливань температури навколишнього середовища в межах ± 50 °C, істотної уваги потребують технічні засоби, що забезпечують зберігання їх якості – рефрижераторні контейнери [3-5].

Питання встановлення потрібної швидкості циркуляції повітря у корисному об'ємі рефрижераторного контейнера є дуже важливим, оскільки суттєво впливає не лише на температуру, вологість збереження якості плодоовочевого вантажу під час його тривалого транспортування, а й на відведення шкідливої дії вуглекислоти, що виділяється з нього з часом і тим самим псує якість. Однак це стосується збереження м'ясної та 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 трубчатого випарника холодильної установки і його вентилятора примусової циркуляції повітря від виробника Carrier Transicold, що розміщені у металевому кожусі.

Моделювання явища перенесення повітря конвекцією найчастіше здійснюють у двовимірній постановці задачі.

За умов примусового руху повітря у корисному

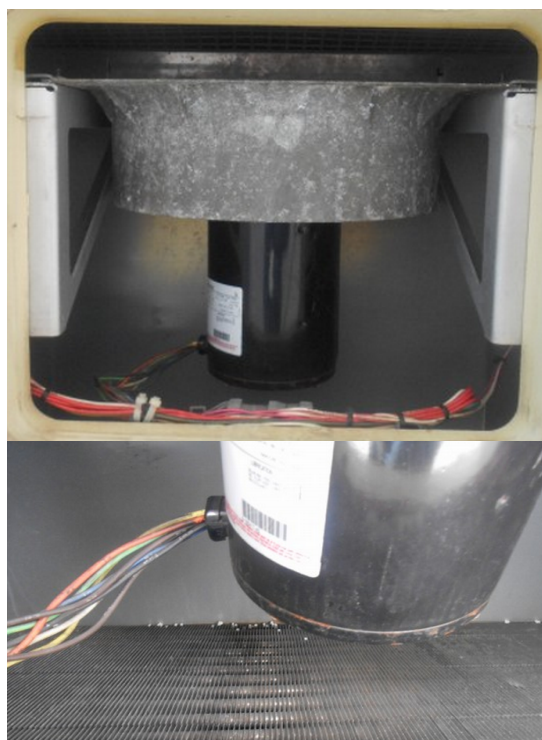


Рисунок 1 - Зовнішній вигляд пристрою трубчатого випарника холодильної установки (внизу) із вентилятором від виробника Carrier Transicold

об'ємі рефрижераторного контейнера й утворений під його впливом розподіл поля температур визначаються динамікою $T_{i,j} = f(v_{i,j}; \partial v_{i,j} / \partial \tau)$ течії речовини, в якій $T_{i,j}$ - температура, $v_{i,j}$ - швидкість, τ - час; тиском p тощо. Водночас теплофізична властивість повітря – в'язкість $\gamma = f(T_{i,j})$ - впливає на поле швидкостей речовини, оскільки $(v_{i,j}; \partial v_{i,j} / \partial \tau) = f(\gamma)$. Відтак розв'язання вирішення задачі перенесення тепла конвекцією зводиться до почергового (ітеративного) розв'язання задач: визначення поля швидкостей речовини за незмінної її в'язкості $\gamma = const$; розрахунку поля температур речовини для одержання поля швидкостей та уточнення в'язкості. Розв'язання задач повторюється в ітераційному циклі за умови одержання збіжності результатів розрахунків і завершується за показником відносної розбіжності значень температур, одержаних у попередній та наступній ітераціях.

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

МАТЕМАТИЧНА ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАДАЧІ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЇЇ ЗМІСТ

Для одержання узагальненого рівняння руху конвекцією речовини із густиною ρ , площею поверхні S , що обмежує визначений нерухомий об'єм V , розглянемо рівняння збереження її маси за малий проміжок часу dt руху крізь поверхню і за наявності утворення додаткової маси внутрішнім джерелом, а

саме у вигляді складової $\frac{d}{dt} \left(\int_V \rho dV \right)$. Вважаючи, що

перенесення речовини здійснюється хаотичним рухом її молекул й, одночасно, рухом всієї речовини конвекцією, оцінимо перенесення молекул за густиною \bar{J}_ρ спрямованої по нормалі \bar{n} до ізоконцентраційної поверхні S елементарного об'єму V , а конвекцію – за щільністю потоку речовини конвекцією $\bar{v}\rho$ де $\bar{v}(u, v)$ - лінійна швидкість речовини у двох координатах. Відтак крізь елементарну поверхню dS об'єму елементарного dV двома видами перенесення маси речовини здійснюється її витікання обсягом

$$\left[- \int_S \bar{J}_\rho \cdot \bar{n} dS - \int_S \bar{v} \cdot \bar{n} dS \right] \rho.$$

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 - Гаусса) і скориставшись законом збереження маси речовини в об'ємі, одержуємо рівняння балансу у вигляді виразу

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = - \int_V \nabla \cdot (\rho \bar{v}) dV - \int_V \nabla \cdot \bar{J}_\rho dV + \int_V I_\rho dV,$$

в якому за двовірної постановки задачі і у прямокутній системі координат вектор градієнту

$\nabla = \bar{i} \frac{\partial}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial}{\partial y}$, а відтак $\nabla \cdot \bar{v}$, є дивергенцією швид-

кості. Оскільки інтегрування здійснюється за спільним об'ємом, матимемо

$$\int_V \left(\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot \bar{J}_\rho - I_\rho \right) dV = 0$$

з якого випливає, що

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = - \nabla \cdot \bar{J}_\rho + I_\rho. \quad (1)$$

Рівняння балансу маси речовини свідчить, що у разі нехтування рухом її молекул $\bar{J}_\rho = 0$ і наявності внутрішнього джерела речовини $I_\rho = 0$, воно

спрощується до виразу $\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0$. Якщо ж розг-

лядати сталий режим перенесення маси конвекцією, локальна похідна $\frac{d\rho}{dt} = 0$, матимемо $\nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0$ або у

двовимірній постановці задачі

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

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 перенесення

речовини за незначних змін її температури й тиску.

Як впливає з вищевказаного, для врахування руху маси речовини потрібно знати її швидкість, а відтак наступним етапом формалізації задачі руху однокомпонентної речовини є розв'язання диференціального рівняння перенесення імпульсу сили - K або кількості руху. Диференціальне рівняння перенесення імпульсу сили одержують з виразу (1), якщо масу або густину речовини, що переноситься, пов'язати із кількістю її руху (імпульсом сили), віднесеного до одиниці об'єму, на основі другого закону Ньютона:

$$m\bar{a} = m \frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{d(m\bar{v})}{dt} = \frac{d\bar{k}}{dt} = \bar{F}.$$

Із урахуванням того, що градієнт густини речовини є пропорційним (розбіжності) дивергенції швидкості $\bar{\rho} \approx \rho \bar{v}$, діючій на елементарний об'єм силі відповідатиме загальна зміна кількості руху в самому об'ємі. Отже, швидкість зміни імпульсу сили визначиться сумою: поверхневого інтеграла від щільності потоку імпульсу, що переноситься конвекцією речовини крізь межі визначеного елементарно-

го об'єму; поверхневого інтеграла від тензора механічних напружень (задача Коші) – нормальних та дотичних, що припадають на три ортогональні площини об'єму та обумовлені вектором масового зусилля $\vec{F}_{i,j}$, діючого на одиницю маси речовини, тобто як $\bar{\sigma}_{i,i} = \frac{d\vec{F}_{i,j}}{dS_i}$, та об'ємного інтеграла від повного вектора масової гравітаційної сили. Поверхневим силам, що 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 перенесення кількості руху речовини одержує вигляд

$$\frac{d(\rho\vec{v})}{dt} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla \cdot \bar{\sigma} + \rho\vec{F}$$

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

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

$$\frac{d(\rho\vec{v})}{dt} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p - \nabla \cdot \bar{\gamma} + \rho\vec{F}, \quad (2)$$

у якому $\bar{\delta} = 1$ - 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 перенесення 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 розв'язання, оскільки має дві шукані величини – вектор швидкості речовини \vec{v} і тензор напружень або щільність молекулярного потоку, що враховується в'язкістю γ .

При розгляді ізотропних речовин із лінійним законом перенесення імпульсу сили для зменшення кількості невідомих у диференціальному рівнянні застосовують реологічне рівняння, що встановлює залежність між девіатором напружень (тензором в'язких напружень) $\nabla \cdot \bar{\gamma}$ і тензором швидкостей деформацій $\nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v})$. У реологічному рівнянні течії в'язкої ізотропної рідини тензор напружень розглядають у вигляді суми двох складових – ізотропної й неізотропної та за їх співвідношення у виразі як одна до двох третин $\bar{\sigma} = [p - \varphi(\nabla \cdot \vec{v})]\bar{\delta} + \bar{\gamma}$ і в якому φ - об'ємна в'язкість речовини, якою зазвичай нехтують унаслідок малих значень. За ламінарної течії речовини її в'язкість пов'язують зі швидкістю за законом Ньютона у вигляді $\gamma = -\eta \frac{\partial v}{\partial n}$, у якому η -

динамічна в'язкість речовини; v - швидкість речовини в напрямку руху; n - нормаль до напрямку швидкості. Для загального випадку реологічне рівняння використовують у вигляді

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

де $(\nabla \cdot \vec{v})^T$ - тензор, спряжений від тензора $\nabla \cdot \vec{v}$ (транспонована матриця).

Із урахуванням останнього диференціального рівняння Нав'є - Стокса, що впливає із рівняння перенесення імпульсу сили (2), одержує вигляд

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

У разі нестискуваної речовини її щільність $\rho = const$, дивергенція швидкості $\nabla \cdot \vec{v} = 0$, а отже рівняння спрощується до вигляду

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

а за умов розглядання сталого процесу переміщення речовини, для якого локальна похідна $\frac{dv}{dt} = 0$, матимемо

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

або як

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

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 із шуканими трьома величинами швидкості і тиску. Отже, для розв'язання задачі використовують додаткове – четверте рівняння закону збереження маси – рівняння нерозірваності, яке у випадку речовини, що не стискається має вигляд $\nabla \cdot \vec{v} = 0$. Як початкові умови застосовують рівняння $\vec{v}(\vec{x}) = \vec{v}^0(\vec{x})$, у якому $\vec{v}^0(\vec{x})$ - задана гладка вектор-функція, що задовольняє рівняння нерозірваності $\nabla \cdot \vec{v}^0 = 0$.

МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РОЗПОДІЛУ ПОВІТРЯ У ВІДСІКУ ВИПАРНИКА

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

Метою роботи є визначення межових значень

швидкості й тиску повітря на виході після випарника холодильної машини рефрижераторного контейнера й такого, що, розміщений у металевому кожусі зі звуженням перерізу вихідного отвору й оснащений системою примусової подачі повітря від вентилятора, що приводиться у дію двошвидкісним однофазним асинхронним двигуном.

Із наведеного на рис.1 пристрою випарника впливає, що повітря під дією примусової конвекції, утвореної 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 залежною 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 з урахуванням поля швидкостей повітря.

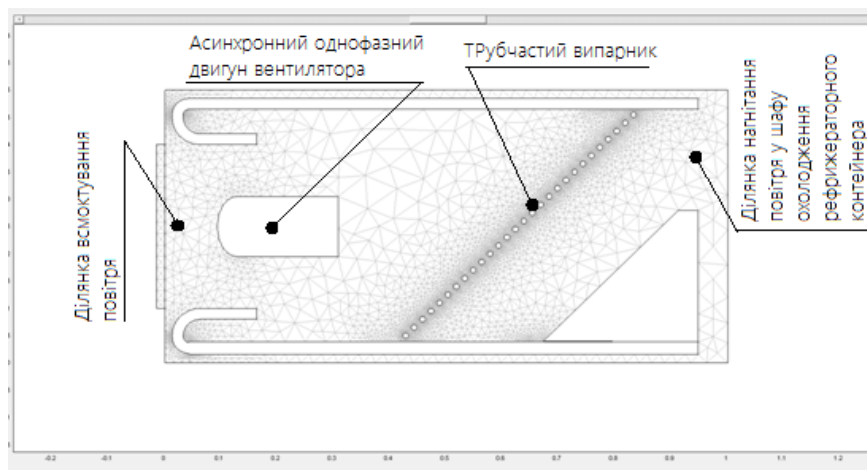


Рисунок 2 - Розрахункова модель випарника холодильної машини, оснащеного вентилятором

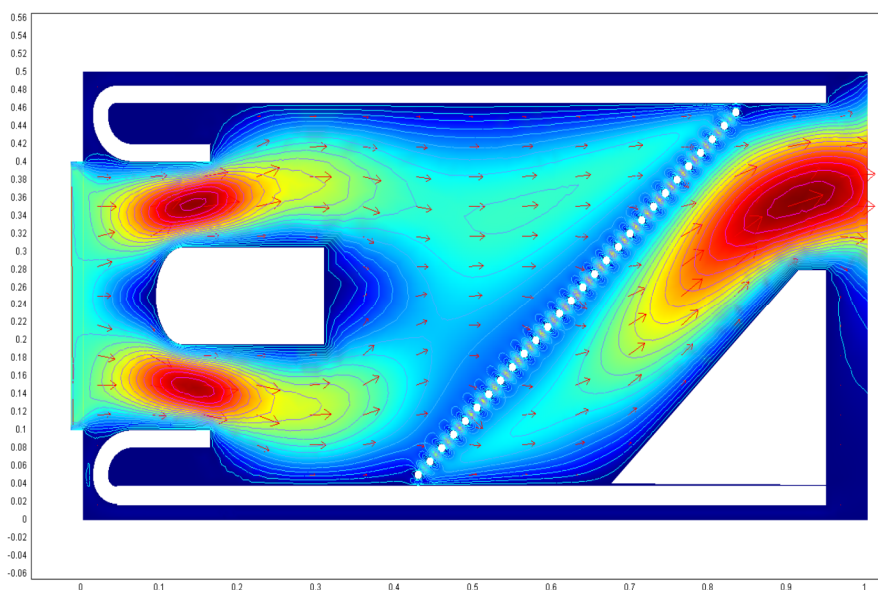


Рисунок 3 - Результати розрахунку поля швидкості повітря у пристрої трубчастого випарника холодильної установки із вентилятором

Для розрахунку межових значень швидкості й тиску повітря на виході після пристрою випарника холодильної машини рефрижераторного контейнера застосовано програмне забезпечення COMSOL Multiphysics Femlab 3.0 у його частині Fluid Dynamics – Incompressible Navier-Stokes.

Змінні і розмірність моделі. Розв'язання рівнянь Нав'є - Стокса дозволяє визначити тиск і складові вектора швидкості повітря у просторі геометричних розмірів моделі за рівнянням його потоку (4), у якому: $\eta = 2.56e-5 (kg/ms)$ - динамічна в'язкість, що встановлює зв'язок між зсувними напруженнями в повітрі до швидкості зсуву; $\rho = 0.6d(kg/m^3)$ - густина, як властивість повітря; \vec{v} - вектор поля швидкості або його складові по осях, що залежать від розмірів геометричної моделі; $p(Pa)$ - тиск; F - масове зусилля, що визначає розподіл силового поля – гравітаційного [1, 2].

Моделювання задачі починається з формування межових умов однозначності: геометричних, якими задаються форма і розміри об'єкта, 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.

У задачі, що розв'язується застосовані межові умови першого і другого роду. Загальний вигляд геометрії області розрахунку, в якому диференціальне рівняння Нав'є - Стокса дозволяє визначити поле швидкості у будь-якій точці, є поділений на елементарні комірки, в яких диференціальне рівняння замінене його кінцево-різнісним аналогом (алгебраїчним рівнянням) (рис. 2), і таким, у якому враховані геометричні розміри комірки та фізичні властивості їх середовища. Отже, алгебраїзація рівняння утворює замість одного рівняння Нав'є - Стокса матрицю рівнянь, розмір якої у двовимірній постановці задачі дорівнює кількості комірок у квадраті.

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

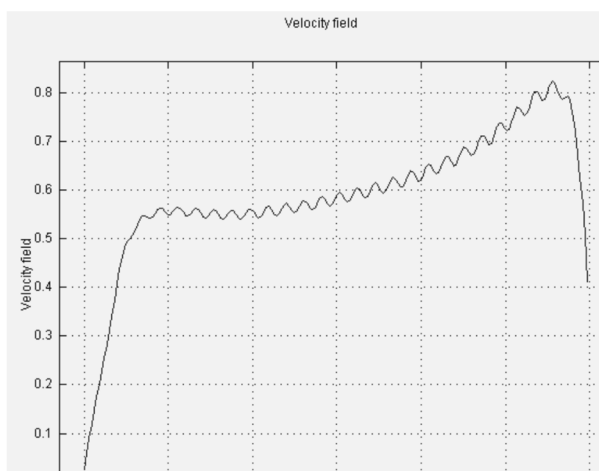


Рисунок 4 - Графіки зміни швидкості повітря до проходження ним випарника

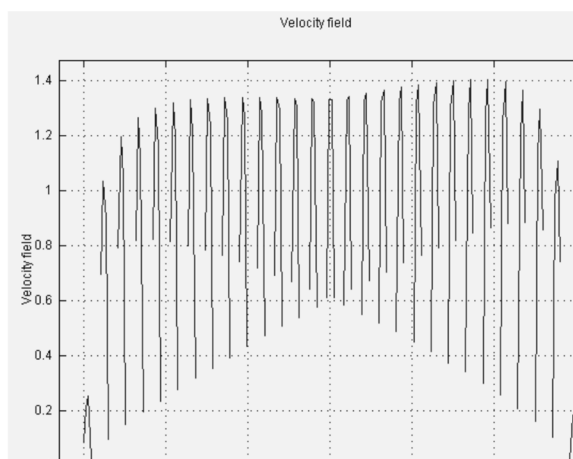


Рисунок 5 - Графіки зміни швидкості повітря вздовж перерізу трубок випарника

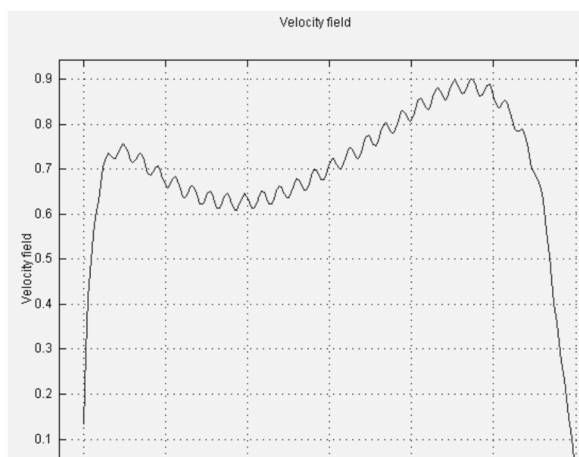


Рисунок 6 - Графіки зміни швидкості повітря після проходження ним випарника

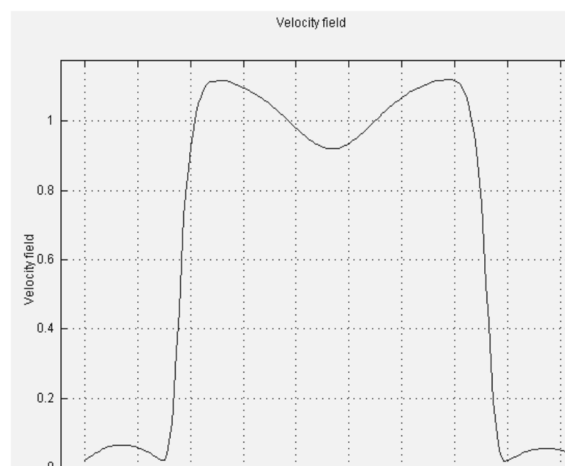


Рисунок 7 - Графік зміни швидкості повітря на виході з шафи охолодження і вході до випарника

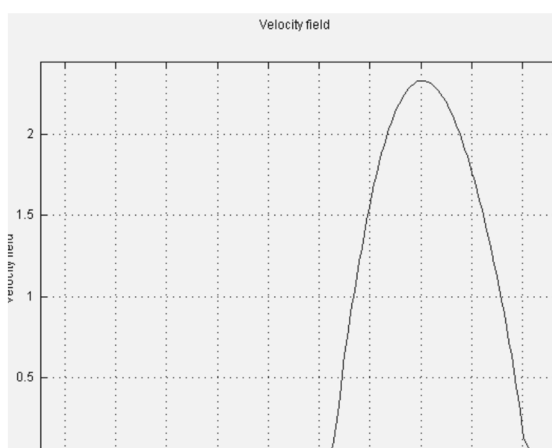


Рисунок 8 - Графік зміни швидкості повітря на виході з випарника і вході до шафи охолодження рефрижераторного контейнера

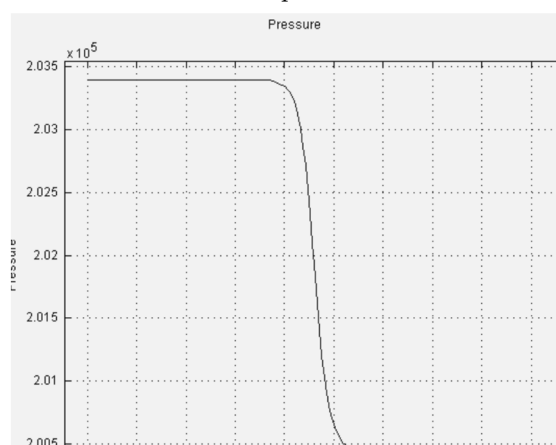


Рисунок 9 - Графік зміни тиску по нормалі до поверхні випарника

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

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

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

На рис. 9 наведений графік зміни тиску повітря, який під дією примусової конвекції вентилятора обтікає трубки випарника із синтезованим холодоагентом, проходячи крізь отвори. Графік зміни тиску побудований по нормалі до поверхні випарника.

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 в об'ємі шафи охолодження рефрижераторного контейнера і на їх основі 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 під час моделювання 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 залежно від побудови повітряного кожуха й вибору форми вихідного сопла.

Simulation of air distribution rate in the evaporator compartment of refrigerating unit of refrigerating container

Y.V. Baidak¹⁾, M. A. Kozminykh²⁾, V. A. Smyk³⁾

¹⁾ Odessa National Academy of Food Technologies, 112, Kanatnaya Str., Odessa, Ukraine, 65039

^{2), 3)} Odessa National Maritime Academy, 8, Didrikhson str., Odessa, Ukraine, 65029

The results of the study relate to the refrigeration unit of refrigerating containers and are aimed at solving the calculating the problem of the air rate field at the outlet of the tubular evaporator with tube axial fan in the metal enclosure. Formulation of the problem and its simulation have been performed for two-dimensional coordinate system, and for its solution software environment COMSOL Multiphysics, Femlab 3.0, Fluid Dynamics - Incompressible Navier-Stokes has been applied. The obtained results allow to establish boundary conditions at solving the calculating problem of the air rates field inside the refrigerating container space, and on its basis, the calculation of temperature field distribution.

Key words: simulation, refrigerating container, refrigeration unit, evaporator, forced convection, rate vector.

Моделирование скорости распределения воздуха в отсеке испарителя холодильной установки рефрижераторного контейнера

Ю.В. Байдак¹⁾, Н.А. Козьминых²⁾, В.А. Смык³⁾

¹⁾ Одесская национальная академия пищевых технологий, ул Канатная, 112, г. Одесса, Украина, 65039

^{2), 3)} Одесская национальная морская академия, ул. Дидрихсона, 8, г. Одесса, Украина, 65029

Результаты работы касаются холодильной установки рефрижераторного контейнера и направлены на решение задачи расчета поля скорости воздуха на выходе трубчатого испарителя с вентилятором принудительного обдува, который расположен в металлическом кожухе. Постановку задачи и ее моделирование выполнено для двухмерной системы координат, а для ее решения применена программная среда COMSOL Multiphysics, Femlab 3.0, Fluid Dynamics - Incompressible Navier-Stokes. Полученные результаты позволяют установить граничные 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляев Н. М. Основы теплопередачи: учебник. - К. : Вища школа, 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.

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

REFERENCES

1. Belyaev N. M. (1989) Osnovyi teploperedachi: Uchebnik.- K.: Vyischa shk. Golovnoe izd-vo, 343 s.: il.
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, John Wiley & Sons.
4. Rose, Alan, and Simpson, Ben (2000): Laminar,

Constant-Temperature Flow Over a Backward Facing Step, 1st NAFEMS Workbook of CFD Examples. Glasgow, UK.

5. Rose, Alan & Simpson, Ben (2000) : Laminar, Constant-Temperature Flow Over a Backward Facing Step, 1st NAFEMS Workbook of CFD Examples. Glasgow, UK