

**Аннотация.** Разработана и изготовлена экспериментальная установка для охлаждения приточного воздуха в птицеводческих помещениях, основанная на применении теплообменников-рекуператоров новой конструкции, в которых в качестве охлаждающего теплоносителя используется вода из подземных скважин. Проведено сравнение результатов численного расчета математического моделирования и экспериментальных данных по теплоотдаче трубного пучка с помощью статистического анализа.

**Ключевые слова:** система вентиляции, экспериментальное исследование, охлаждение воздуха, численное моделирование, птицеводческое помещение.

## EXPERIMENTAL STUDY OF COOLING AIR SUPPLY POULTRY PREMISES

*V. Trokhanyak, V. Gorobets, Y. Bogdan*

**Annotation.** Designed and built an experimental setup for cooling supply air in the poultry houses, based on the use of heat exchangers, heat exchangers of a new design in which the coolant is used as cooling water from underground wells. A comparison of the results of a numerical calculation of mathematical modeling and experimental data on heat transfer tube bundle by statistical analysis.

**Key words:** ventilation system, experimental research, air cooling, numerical simulation, a poultry premises.

УДК536.24

## ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПЕРЕНОСУ В НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ АКУМУЛЯТОРАХ ТЕПЛОТИ ПРИ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕННЯХ АКУМУЛЮЮЧОГО МАТЕРІАЛУ

**Є. О. Антипов, асистент**  
e-mail: [ievgeniy\\_antypov@ukr.net](mailto:ievgeniy_antypov@ukr.net)

**Анотація.** Розроблено конструкцію та проведено чисельне моделювання теплопереносу в акумуляторі теплоти. Моделювання виконано з використанням програмного комплексу COMSOL Multiphysics 3.5a. Вивчено та проаналізовано отримані значення динаміки накопичення теплової енергії в досліджуваному об'єкті.

**Ключові слова:** акумулятор теплоти, теплоакумулюючий матеріал, теплообмінні процеси, фазовий перехід.

Проведений аналіз різноманітних джерел [1–3] виявив недостатність інформації щодо використання нових способів чисельного моделювання перехідних фізичних процесів, які відбуваються при фазових перетвореннях акумулюючого матеріалу. Здебільшого, для їх опису використовують інженерні методики, які базуються на напівемпіричних рівняннях подібності та інтегральних методах, але вони неспроможні повною мірою описати характер протікання того чи іншого фізичного процесу в умовах, наближених до реальних. У багатьох випадках це призводить до неправильних результатів.

Зазначене дає право розглядати використання обчислювальних технологій, що реалізуються в спеціалізованих обчислювальних пакетах програмного забезпечення, напрямком експериментальних і модельних досліджень задля розуміння фізичного механізму процесів фазового переходу в акумулюючих матеріалах при використанні їх як робочого середовища в акумуляційних апаратах. Запропоноване рішення дає змогу розраховувати з прийнятною для практики точністю тепло- та масообмінні й гідродинамічні процеси у стаціонарних та перехідних режимах роботи обладнання в умовах, наближених до реальних.

**Мета досліджень** – використання комп'ютерних програм для чисельного дослідження процесів фазового переходу в теплоаккумулюючих матеріалах органічного походження.

**Матеріали та методика досліджень.** При моделюванні процесів переносу в елементі теплового акумулятора використовувалося середовище програмного комплексу COMSOL Multiphysics 3.5a. Описання досліджуваних процесів тепло- і масообміну в апараті, виконувалося на основі: рівняння Нав'є – Стокса, закону Фур'є та рівняння теплопровідності, за умови фазового переходу. Переміщення межі поділу фаз описується відповідними рівняннями нерозривності, збереження імпульсу, енергії, маси та доповнене рівняннями теплообміну, теплопровідності, тепловіддачі, а також граничними та початковими умовами.

Для довільного моменту часу  $t$  без урахування неоднакового розподілу температур в об'ємі акумулюючого матеріалу, рівняння балансу енергії акумулятора теплоти фазового переходу, має вигляд:

$$\frac{V_{\phi} \cdot \rho \cdot (C_p \cdot dT_{\phi}(\tau) + h_{\phi})}{d\tau} = Q_{ax}(\tau) - Q_{вих}(\tau) - Q_{із}(\tau), \quad (1)$$

де  $V_{\phi}$  – об'єм акумулюючого матеріалу, який зазнає фазових перетворень, м<sup>3</sup>;

$\rho$  – густина середовища, кг/м<sup>3</sup>;

$C_p$  – питома ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К);

$T_{\phi}(\tau)$  – температура фазового перетворення матеріалу, К;

$h_{\phi}$  – прихована теплота фазового перетворення матеріалу, Дж/кг;

$Q_{вх}(\tau)$  і  $Q_{вих}(\tau)$  – тепла потужність на вході та на виході з акумулятора теплоти, Вт;

$Q_{із}(\tau)$  – теплові втрати в навколишнє середовище через шар теплоізоляції, Вт.

Для дослідження нестационарного процесу теплопереносу в об'ємі акумулюючого матеріалу, який виникає за умови, що теплоносії (вода) надходить в акумулятор з малою швидкістю і рухається вздовж нагрівальних труб (теплообмінної поверхні), віддаючи при цьому теплову енергію, яка згодом накопичується в акумулюючому матеріалі такого апарата, COMSOL Multiphysics використовує рівняння:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla \cdot (-k \nabla T + \rho C_p u \cdot \nabla T) = Q, \quad (2)$$

де  $k$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;

$T$  – абсолютна температура, К;

$u$  – вектор швидкості, м/с;

$Q$  – потужність джерела теплоти, Вт.

Вираз  $(-k \nabla T + \rho C_p u \cdot \nabla T)$  являє собою щільність потоку теплової потужності в рідкій фазі теплоносія та акумулюючого матеріалу, яка підводиться/відводиться від нагрівальних труб під час плавлення останнього та складається з двох компонент: кондуктивної і конвективної. Коли активний конвективний теплообмін, швидкість  $u$  в COMSOL Multiphysics можна визначити використовуючи гідродинамічні моделі: Incompressible Navier-Stokes (нестискуваного Нав'є – Стокса) або Non-Isotermal Flow (неізотермічного потоку). Тоді, теплопередача опишеться рівнянням:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho C_p \vec{u} \nabla T = k \nabla^2 T. \quad (3)$$

При кристалізації акумулюючого матеріалу швидкість поширення конвективних потоків в ньому дорівнює нулю, тобто передача теплоти в твердому матеріалі відбувається лише кондуктивним способом, тоді в решті-решт ми отримаємо основне рівняння чистої теплопровідності в тілі:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q. \quad (4)$$

При цьому, для матеріалів, які в процесі теплообміну зазнають фазових перетворень в інтервалі температур  $T_{\min} - T_{\max}$ , COMSOL Multiphysics, використовуючи логічну функцію, питому ефективну теплоємність визначає:

$$C_p = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } T \approx T_{\min} < T_{\phi}; \\ \Delta h_{\phi}, \text{ якщо } T_{\phi} \leq T < T_{\max}; \\ C_2, \text{ якщо } T \approx T_{\max}, \end{cases} \quad (5)$$

де  $C_1$  та  $C_2$  – теплоємність матеріалу у твердій та рідкій фазі, Дж/кг·К.

Як початкові умови було задано:

$$T(r, 0) = T_0, 0 < r < R, \quad (6)$$

де  $r$  – радіус поширення теплоти в об'ємі матеріалу, м;

$R$  – кінцеве (граничне) значення поширення теплоти, м;

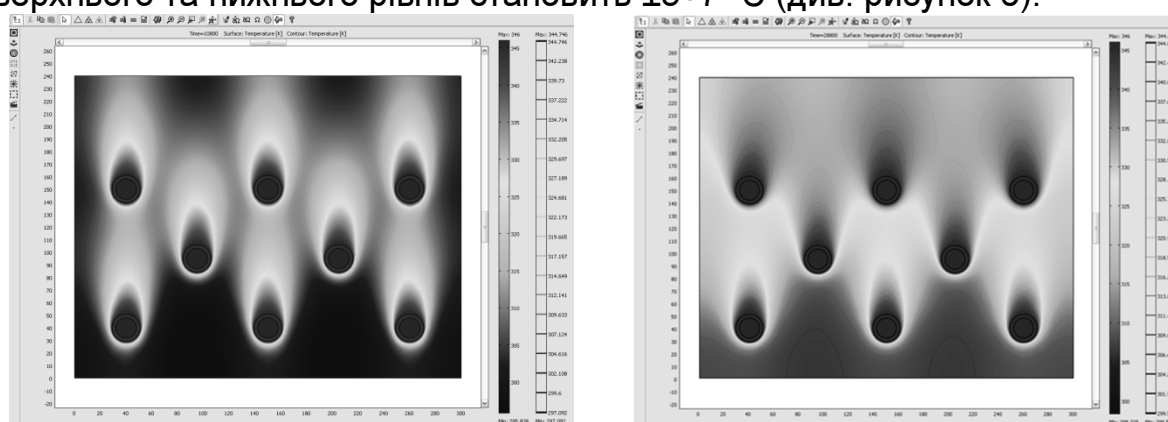
$T_0$  – початкова температура матеріалу, К,

та граничних (умови теплової ізоляції):

$$\begin{cases} \nabla \cdot (-k \nabla T) = 0; \\ T = T_{is}(\tau), \end{cases} \quad (7)$$

де  $T_{is}$  – температура поверхні теплоізоляції, К.

**Результати досліджень.** У результаті проведеного чисельного моделювання процесів тепломасообміну в об'ємі акумулюючого матеріалу було досліджено вплив вільної конвекції на інтенсивність процесів перенесення теплоти при фазовому переході речовини з твердого в рідкий стан. Зокрема встановлено, що внесок конвективного потоку в загальну картину плавлення акумулюючого матеріалу, навколо циліндричного джерела теплоти з гладкою поверхнею, призводить до підвищення ефективності процесу та швидкості плавлення матеріалу, розміщеного над джерелом теплоти. Разом з тим, у локальних розподілах температур від границі розділу фаз всередину твердого масиву, спостерігається різка зміна температур, що свідчить про наявність зон низької швидкості плавлення в нижній пристінній області та біля дна корпусу акумулятора теплоти. У цьому разі, відмінність між значеннями температур в об'ємах матеріалу верхнього та нижнього рівнів становить  $\pm 5 \div 7$  °C (див. рисунок б).



а

б

**Динаміка поширення температурних полів у поперечному перерізі об'єму акумулюючого матеріалу досліджуваної конструкції акумулятора теплоти:**

а – через 10800 с; б – 28800 с

Аналіз роботи [4] та результатів проведеного чисельного дослідження ефективності конструкції акумулятора теплоти фазового переходу дає змогу зробити таке припущення: *зادля кращого прогріву акумулюючого матеріалу нижніх рівнів, розміщення першого ряду нагрівальних труб, від дна та стінок корпусу акумулятора, слід виконувати на відстані, яка не перевищує значення граничного радіусу  $R$ , поширення теплоти в об'ємі акумулюючого матеріалу, попередні значення якого наведені в таблиці.*

**Попередні значення граничного радіусу поширення теплоти в об'ємі акумулюючого матеріалу фазового переходу**

Параметр	Номинальний діаметр (дюйми)					
	½	¾	1	1 ¼	1 ½	2
Умовний прохід, мм	13	19	25	32	38	50
Зовнішній діаметр теплообмінних труб, мм	21,25	26,75	33,50	42,25	48,00	60,00
Граничний радіус радіального поширення теплоти, мм	30,00	35,00	45,00	57,00	70,00	85,00

## Висновки

У результаті проведеного чисельного моделювання та аналізу досліджуваних процесів тепло- та масопереносу в об'ємі акумулюючого матеріалу, який змінює свій агрегатний стан, отримано розподіли температурних полів і напрямки поширення теплових потоків в об'ємі акумулюючого матеріалу та встановлено, що:

- наявність конвективних теплових потоків підвищує ефективність процесу теплопереносу та швидкість плавлення матеріалу, розміщеного над джерелом теплоти;

- існування застійних зон у кутових областях нижньої частини об'єму акумулюючого матеріалу, дало змогу досягти оптимального розміщення елементів теплообмінної поверхні в корпусі акумулятора;

- з метою кращого прогріву акумулюючого матеріалу нижніх рівнів, розміщення першого ряду нагрівальних труб в акумуляторі теплоти доцільно виконувати від дна та стінок корпусу на відстані, яка не перевищує  $R$ .

## Список літератури

1. Спэрроу Е. М. Экспериментальное исследование роли естественной конвекции при расплавлении твердых веществ / Е. М. Спэрроу, Р. Р. Шмидт, Ж. М. Рэмси // Теплопередача. – 1978. – № 1. – С. 10–16.

2. Соуза-Мендес. Теплообмен при плавлении в окрестности изотермического вертикального цилиндра / Соуза-Мендес, Пиньо-Бразил мл. // Теплопередача. – 1988. – № 3.

3. Хо. Теплопередача при плавлении от изотермической вертикальной стенки / Хо, Висканта // Теплопередача. 1984. – № 1. – С. 9–18.

4. Горобец В. Г. Компьютерное моделирование процессов теплопереноса в сезонном аккумуляторе теплоты / В. Г. Горобец, Е. А. Антипов // Вестник ВИЭСХ. – 2014. – № 1 (14). – С. 15–19.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АККУМУЛЯТОРАХ ТЕПЛОТЫ ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ АККУМУЛИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

*Е. А. Антипов*

*Аннотация. Разработана конструкция и проведено численное моделирование теплопереноса в сезонном аккумуляторе теплоты. Моделирование выполнено с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics 3.5a. Изучены и проанализированы полученные значения динамики накопления тепловой энергии в исследуемом объекте.*

*Ключевые слова: тепловой аккумулятор, аккумулирующий материал, теплообменные процессы, фазовый переход.*

## NUMERICAL STUDY OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN LOW-TEMPERATURE HEAT ACCUMULATOR IN PHASE TRANSFORMATIONS ACCUMULATE MATERIAL

*E. Antipov*

**Annotation.** *Modeling the process of heat and mass transfer is executed with the use of program complex the COMSOL Multiphysics 3.5a. As a result of numerical calculation the temperature fields are got in the system a pipe bunch and heat-accumulating material. The dynamics of accumulation process of thermal energy in the investigated object is studied.*

**Key words:** *heat accumulator, accumulating material, heat exchange processes, phase transition.*

УДК 663.18; 621.311.26.031

## **МЕТОДИКА ВИРОЩУВАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ У ФОТОРЕАКТОРІ ПРИ УТИЛІЗАЦІЇ ГАЗІВ ТВЕРДООКСИДНИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

***Н. В. Бурега, аспірант\****

***Тернопільський національний педагогічний університет***

***імені В. Гнатюка***

***e-mail: rutmik@ukr.net***

**Анотація.** *Розроблено методику вирощування водоростей, запропоновано конструкцію плоского, вертикального фотореактора промислового типу.*

**Ключові слова:** *фотореактор, живильне середовище, вуглекислий газ, мікроводорості, *Chlorella vulgaris*.*

Дедалі більше наукових відкриттів, що здійснюються в нашій країні, зумовлюються необхідністю постійного економічного зростання, яке неминує призводить до збільшення споживання енергоносіїв та негативного глобального антропогенного впливу парникових газів на Земну екосистему. Тому в останніх дослідженнях зосереджено увагу на пошуку нових, дешевих відновлюваних джерел енергії або способів зменшення викидів вуглекислоти.

Одним із найбільш перспективних напрямів енергетики у комплексах генерації теплової та електричної енергії є використання мікробіотехнологій. Оскільки життєвий цикл одноклітинних мікроводоростей супроводжується швидким метаболізмом та фотосинтезом, вони можуть бути використані як фільтр вуглекислоти, так і генератора біопалива.

**Мета досліджень** – аналіз методів лабораторного культивування мікроводоростей та розробка методики їх вирощування з подачею повітря з підвищеним вмістом CO<sub>2</sub> у плоскому фотореакторі.

**Матеріали і методика досліджень.** Дослідження процесу утворення екологічно чистої, високоенергетичної біосировини базується на законах збереження маси, електротехніки, електрохімії та біологічних процесах фотосинтезу.

---

\* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В. С. Федорейко