

УДК 620.91:662.997:631.563.2

В.Ф.Резцов, чл.-кор. НАН України, **Т.В.Суржик**, канд.техн.наук, **В.А.Щокіна** (Ін-т відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Модель нестационарної зміни середньої температури вологовмісних середовищ у процесах геліосушки

В роботі наведено застосування інтегральної теореми векторного аналізу про дивергенцію для отримання диференціального рівняння для середньооб'ємної температури вологовмісних середовищ при геліосушці. Запропоновано методика аналізу флуктуацій середньої температури внаслідок зміни потужності сонячного випромінювання, температури оточуючого середовища та термодинамічних характеристик, що визначають теплообмін вологовмісних середовищ із оточуючим середовищем.

Ключові слова: геліосушка, вологовмісне середовище, конвекція, фільтрація, теплова флуктуація, сонячне випромінювання.

В работе приведено применение интегральной теоремы векторного анализа о дивергенции для получения дифференциального уравнения для среднеобъемной температуры влагосодержащих сред при гелиосушке. Предложена методика анализа флуктуаций средней температуры вследствие изменения мощности солнечного излучения, температуры окружающей среды и термодинамических характеристик, определяющих теплообмен влагосодержащих сред с окружающей средой.

Ключевые слова: гелиосушка, влагосодержащая среда, конвекция, фильтрация, тепловая флуктуация, солнечное излучение.

Вступ. Геліосушка є одним із природних процесів взаємодії енергії сонячного випромінювання з вологовмісним середовищем, що приводить до формування просторово неоднорідних структур на поверхні і в об'ємі середовища. Ці процеси супроводжуються нестационарною зміною температури вологовмісного середовища, тому є актуальним розглянути зміну середньої температури на поверхні та в об'ємі вологовмісного середовища і проаналізувати флуктуації середньої температури внаслідок зміни потужності сонячного випромінювання, температури оточуючого середовища і термодинамічних характеристик за допомогою інтегральної теореми векторного аналізу про дивергенцію.

Постановка задачі. Базовим диференціальним рівнянням для зміни температури в часі та просторі при геліосушці вологовмісних середовищ з урахуванням переносу теплової енергії конвекцією за рахунок фільтрації вологи, згідно з [1], обрано наступне рівняння:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \Delta T + \rho C_p \vec{V} \cdot \nabla T = F_{T+} + F_{T-} \quad (1)$$

Тут T , t – температура і час відповідно; ρ , C_p , λ – відповідно густина, питома теплоємність

і коефіцієнт теплової провідності; \vec{V} – швидкість фільтрації вологи; F_{T+} – густина тепловиділення внаслідок поглинання сонячного випромінювання (позитивна); F_{T-} – густина тепловиділення внаслідок процесу випаровування вологи (негативна).

Враховуючи те, що ρ , C_p , λ , F_{T+} , F_{T-} , природно, можуть залежати як від координат, так і від температури, в подальшому зробимо припущення про те, що ці параметри є постійними, хоча в деяких випадках це не є обов'язковим.

Метод перетворення моделі нестационарної теплової провідності до інтегральної форми.

За визначенням середньоінтегральною температурою T_{cp} є величина, яка визначається виразом:

$$T_{cp} = \frac{\int T dV}{V}, \quad (2)$$

де V – це об'єм, який займає вологовмісне середовище.

Якщо комплекс ρC_p залежить від координат або температури, і це є принциповим, то замість (2)

можна ввести до розгляду функцію повної теплової енергії W :

$$W = \int_V \rho C_p T dV. \quad (3)$$

Згідно з визначеннями (2), (3) для переходу від диференціальної форми (1) до інтегральної необхідно рівняння (1) проінтегрувати по об'єму V , в результаті чого отримуємо:

$$\int_V \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dV - \int_V \lambda \Delta T dV + \int_V (\rho C_p \vec{V} \cdot \nabla T) dV = Q_+ + Q_-, \quad (4)$$

де

$$Q_+ = \int_V F_{T+} dV, \quad Q_- = \int_V F_{T-} dV. \quad (5)$$

Тут Q_+ , Q_- – інтегральні величини позитивного тепловиділення внаслідок поглинання сонячного випромінювання та негативного тепловиділення внаслідок випаровування вологи, які залежать від просторового розподілу температури T і, відповідно, середньої температури T_{cp} . У загальному випадку

$$Q_+ = Q_+(T_{cp}), \quad Q_- = Q_-(T_{cp}).$$

В подальшому методика отримання рівняння для середньої по об'єму V температури T_{cp} полягає у спрощенні окремих складових рівняння (4) із визначенням необхідних при цьому припущень:

1. Складова $\int_V \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dV$ може бути пере-

творена до вигляду:

$$\rho C_p V \frac{dT_{cp}}{dt} \quad (6)$$

в тому випадку, коли, по-перше, $\rho C_p = const$, а по-друге – середовище є нерухомим, що дозволяє похідну в часі $\frac{\partial}{\partial t}$ винести за знак інтеграла по V .

2. Складова $-\int_V \lambda \Delta T dV$ із застосуванням

теорему про дивергенцію [2] може бути перетворена в інтеграл по замкненій поверхні S , що

оточує об'єм V . Це є можливим тому, що згідно закону Фур'є

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T, \quad (7)$$

де коефіцієнт теплової провідності λ може залежати як від координат, так і від температури (підінтегральна функція $\lambda \Delta T = -\nabla \cdot (\lambda \nabla T)$).

Таким чином, виконується співвідношення:

$$Q_{ST} = -\int_V \lambda \Delta T dV = \oint_S \vec{q} \cdot d\vec{S}, \quad (8)$$

де \vec{q} – вектор густини теплового потоку на поверхні S , а $d\vec{S}$ – вектор елементарної площини до поверхні S ($d\vec{S} = \vec{n} |d\vec{S}|$, де \vec{n} – вектор одиничної зовнішньої нормалі до поверхні S).

Важливим є те, що величина Q_{ST} , яка фізично визначається умовами теплообміну вологовмісного середовища з оточуючим його зовнішнім середовищем, може бути визначена шляхом розрахунків або експериментально.

3. Складова Q_+ , яка фізично являє собою інтегральну величину енергії сонячного випромінювання, що поглинається в об'ємі вологовмісного середовища, також може бути визначена через інтегральні характеристики сонячного випромінювання на поверхні S . Це впливає з того, що для обраної частоти сонячного випромінювання ω величина F_{T+} згідно з [3] визначається співвідношенням:

$$F_{T+i} = \nabla \cdot \vec{\Pi}_i, \quad \vec{\Pi} = \vec{E}_i \times \vec{H}_i, \quad (9)$$

де \vec{E} , \vec{H} – вектори напруженості електричного і магнітного поля для обраної частоти сонячного випромінювання; $\vec{\Pi}$ – вектор Умова-Пойнтінга, який характеризує густину потужності сонячного випромінювання.

Після підсумовування (9) по всіх частотах ω_i відповідно до кривої Планка та після застосування теореми про дивергенцію можна отримати наступні співвідношення:

$$\int_V F_{T+i} dV = \int_V (\nabla \cdot \vec{\Pi}_i) dV = \oint_S \vec{\Pi}_i \cdot d\vec{S}, \quad (10)$$

$$Q_+ = \sum_i \oint_S \vec{\Pi}_i \cdot d\vec{S}.$$

Тобто величина Q_+ є сумарною потужністю сонячного випромінювання, що поглинається вологовмісним середовищем на поверхні S , яка відома з розрахункових або експериментальних даних.

4. Складова Q_- визначає втрати теплової енергії у вологовмісному середовищі внаслідок випаровування вологи, якщо відомі зміни температури та вологості повітря при геліосуші.

5. Складова $\int_V (\rho C_p \vec{V} \cdot \nabla T) dV$ безпосередньо не може бути перетворена в інтеграл по поверхні.

Але якщо ввести до розгляду векторну функцію $\vec{W} = \vec{V} \cdot T$, то для цієї функції виконується співвідношення:

$$\nabla \cdot \vec{W} = \vec{V} \cdot \nabla T + T \nabla \cdot \vec{V}. \quad (11)$$

Тоді для соленоїдного наближення в гідродинаміці [4] та класичної теорії фільтрації [5] для соленоїдного режиму течії можна покласти $\nabla \cdot \vec{V} = 0$. З урахуванням цього, при $\rho C_p = const$ отримуємо:

$$\int_V \rho C_p \vec{V} \cdot \nabla T dV = \rho C_p T_S \oint_S \vec{V} \cdot d\vec{S}, \quad (12)$$

де T_S – усереднена температура вологовмісного середовища на поверхні S .

Таким чином, за припущення про те, що середня по об'єму і середня по поверхні температура вологовмісного середовища співпадають, узагальнене рівняння їх зміни в часі описується наступним рівнянням:

$$\frac{dT_{cp.}}{dt} = a + bT_{cp.}, \quad (13)$$

де коефіцієнти a , b включають у себе теплофізичні характеристики середовища, що обробляється, параметри сонячного випромінювання, а також температуру оточуючого середовища та умови теплообміну з ним.

Деякі методики аналізу динаміки зміни середньої температури в часі.

1. Усталений режим. У цьому режимі

$$\frac{dT_{cp.}}{dt} = 0 \text{ і, відповідно, } T_{cp.} = -\frac{a}{b}.$$

2. Аналіз стійкості до малих збурень $\delta T_{cp.}$. Представляємо $T_{cp.}$ у вигляді

$$T_{cp.} = T_{cp.o} + \delta T_{cp.}, \quad |\delta T_{cp.}| \ll T_{cp.o}, \quad (14)$$

$$\delta T_{cp.} = \delta T_{cp.a} \exp(\omega t),$$

де $T_{cp.o}$ – середня температура для незбуреного стану; $\delta T_{cp.a}$ – амплітуда збурень; ω – частота збурень. Підставляючи (14) в (13), отримуємо, що частота збурень $\omega = b$.

3. Характер зміни $T_{cp.}$ в часі.

$$T_{cp.}(t) = \frac{A}{b} e^{bt} - \frac{a}{b}, \quad A = a + bT_{cp.}(t=0) \quad (15)$$

і відповідає як рівнянню (14), так і початковій умові.

4. Аналіз часових гармонійних складових $T_{cp.}(t)$ при малих флуктуаціях коефіцієнтів a і b .

Випадок 4а. $a = a_0 + \varepsilon a_1$; $\varepsilon \ll 1$, a_1 – синусоїдальна функція з частотою ω .

Представляючи в (14) функцію $T_{cp.}$ у вигляді:

$$T_{cp.} = T_{cp.o} + \varepsilon T_{cp.1} + O^2(\varepsilon), \quad (16)$$

для складової $T_{cp.1}$ отримуємо наступне рівняння:

$$\frac{dT_{cp.1}}{dt} = a_1 + bT_{cp.1}. \quad (17)$$

Далі, вводячи замість a_1 та $T_{cp.1}$ комплексні аналоги

$$a_1(t) \rightarrow \dot{a}_1 \exp(i\omega t),$$

$$T_{cp.1}(t) \rightarrow \dot{T}_{cp.1} \exp(i\omega t), \quad i^2 = -1, \quad (18)$$

отримуємо наступний вираз для комплексної амплітуди $\dot{T}_{cp.1}$:

$$\dot{T}_{cp.1} = -\frac{(b + i\omega)\dot{a}_1}{b^2 + \omega^2}. \quad (19)$$

Випадок 4б. $b = b_0 + \varepsilon b_1$.

В цьому випадку для $\dot{T}_{cp.1}$ отримуємо:

$$\dot{T}_{cp.1} = -\frac{(b_0 + i\omega)T_{cp.o}\dot{b}_1}{b_0 + \omega^2}. \quad (20)$$

Вирази (19), (20) при їх зіставленні зі спектрами флуктуацій температури навколишнього середовища та потужності сонячного випромінювання

нювання дають можливість якісно визначити фізичні причини флуктуацій температури при геліосуші вологовмісних середовищ.

Висновки. 1. На основі застосування фундаментальної інтегральної теореми векторного аналізу про дивергенцію отримано звичайне диференціальне рівняння для середньооб'ємної температури вологовмісних середовищ при геліосуші з урахуванням конвективного переносу теплової енергії та фільтрації вологи.

2. Розроблено підхід до визначення параметрів усталеного стану та динаміки зміни середньої температури в часі з аналізом класичної теорії стійкості. Запропоновано методу аналізу флуктуацій середньої температури внаслідок зміни потужності сонячного випромінювання, температури оточуючого середовища, а також термодинамічних характеристик, що визначають тепло-

обмін вологовмісних середовищ із оточуючим середовищем.

1. Лыков А.В. Теория сушки / 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / пер. с англ. И.Г. Арамановича, А.М. Березмана, И.А. Вайнштейна, Л.З. Румшисского, Л.Я. Цлафа, под общей ред. И.Г. Арамановича. – Москва: Изд-во "Наука", 1973. – 832 с.

3. Кудря Т.С., Резцов В.Ф., Суржик Т.В. Анализ поглощаемой и запасаемой энергии солнечного излучения в средах на основе теоремы Умова-Пойнтинга в комплексной форме // Відновлювана енергетика. – 2007. – №1. – С. 34–37.

4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика / 3-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. – Т. VI. – 736 с.

5. Баренблатт Г.И. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. – М.: Недра, 1972. – 288 с.

УДК 697.7: 504.062

Э.А.Бекиров, докт. техн. наук, С.Н.Воскресенская, канд. техн. наук, М.М.Асанов, канд. физ.-мат. наук
(Национальная академия природоохранного и курортного строительства, Симферополь)

Обеспечение энергоснабжения с помощью гелиосистемы на базе отработанного карьера в качестве теплового аккумулятора

В работе анализируется возможность использования отработанного карьера для обеспечения теплоснабжения с помощью солнечных коллекторов, когда сам карьер используется как тепловой аккумулятор. Этот экологически чистый технологический процесс теплоснабжения улучшит климатическую обстановку и экологическую безопасность региона. Основной задачей является определение параметров эффективного режима эксплуатации гелиосистемы с теплоэнергетической и экологической точки зрения.

Ключевые слова: теплоснабжение, солнечный коллектор, гелиосистема, тепловой аккумулятор, отработанный карьер, экологическая безопасность.

У роботі аналізується можливість використання відпрацьованого кар'єру для забезпечення теплопостачання за допомогою сонячних колекторів, коли сам кар'єр використовується як якість теплового акумулятора. Цей екологічно чистий технологічний процес теплопостачання поліпшить кліматичну обстановку і екологічну безпеку регіону. Основним завданням є визначення параметрів ефективного режиму експлуатації геліосистеми з теплоенергетичної та екологічної точки зору.

Ключові слова: теплопостачання, сонячний колектор, геліосистема, тепловий акумулятор, відпрацьований кар'єр, екологічна безпека.

Введение. Обеспечение экологической безопасности – один из важнейших аспектов развития современного общества. При увеличении темпов выработки тепловой и электрической энергии и различного рода производства пропорционально

увеличиваются выбросы вредных веществ в окружающую среду. К таким веществам относятся твердые частицы, такие как пыль и зола, оксиды серы (SO₂ и SO₃), оксиды азота (NO, NO₂), оксиды углерода (CO, CO₂), углеводороды (C_xH_y). На