

Кугаєвська Т.С., к.т.н., доцент
Шульгін В.В., к.т.н., доцент
Юрченко М.О., магістр

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ПРОЦЕСИ ТЕПЛООБМІНУ В ПЛОСКОМУ КОЛЕКТОРІ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Відображено процеси теплообміну в плоскому колекторі сонячної енергії, який є складовою частиною установки, призначеної для теплової обробки гідроізованих бетонних виробів нагрітим повітрям.

Наведено теплові баланси світлопрозорого покриття, теплосприймаючої металевий пластини та шару теплоізоляції, а також загальний тепловий баланс колектора сонячної енергії. Показано результати обчислення інтенсивності нагрівання повітря в колекторі сонячної енергії впродовж початкового проміжку часу при різній витраті повітря.

Наголошено, що остаточне рішення стосовно оптимальної кількості повітря, котре циркулює в установці, необхідно приймати на основі сумісного аналізу теплових балансів колектора сонячної енергії та камери для теплової обробки гідроізованих бетонних виробів.

Ключові слова: колектор сонячної енергії, нагріте повітря, тепловий баланс.

Кугаевская Т.С., к.т.н., доцент
Шульгин В.В., к.т.н., доцент
Юрченко М.А., магистр

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА В ПЛОСКОМ КОЛЛЕКТОРЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Отображены процессы теплообмена в плоском коллекторе солнечной энергии, который является составляющей частью установки, предназначенной для тепловой обработки гидроизолированных бетонных изделий нагретым воздухом.

Приведены тепловые балансы светопрозрачного покрытия, тепловоспринимающей металлической пластины и слоя теплоизоляции, а также общий тепловой баланс коллектора солнечной энергии. Показаны результаты вычисления интенсивности нагревания воздуха в коллекторе солнечной энергии в течение начального периода времени при разных расходах воздуха.

Указано, что окончательное решение относительно оптимального количества воздуха, который циркулирует в установке, принимается на основании совместного анализа тепловых балансов коллектора солнечной энергии и камеры для тепловой обработки гидроизолированных бетонных изделий.

Ключевые слова: коллектор солнечной энергии, нагретый воздух, тепловой баланс.

*Kugaevska T., PhD, Associate Professor
Shulgin V., PhD, Associate Professor
Yurchenko M., master student
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

PROCESSES OF HEAT EXCHANGE IN A PLANAR SOLAR ENERGY COLLECTOR

One of the ways for reducing the cost of thermal treatment of concrete and reinforced concrete products is the use of solar energy. Introduction into production of method of acceleration of curing with heated air of these products requires development of the installation. The installation consists of: planar solar energy collector, cameras for heat treatment hydro-insulated concrete or of reinforced concrete products, the fan, ducts. The air is heated in solar energy collector, enters the camera and heats the product. When the air is cooled it returns back to the reservoir.

Quantitative analysis of processes of heat exchange in the solar energy collector is one of the factors determining design features of the collector and installation. Temperature field in the collector isn't stationary. The overall time during which air is heated, divided into intervals duration of $\Delta\tau$.

Thermal balances are folded for each time period, for light transparent cover; for heat accepting metal plate and heat isolation layer; for solar energy collector. The joint solution of these balances allows determining intensity of heating the air in the solar energy collector during each of the selected time periods.

Heat supply to the collector for the selected time period consist of amount of solar energy absorbed by the light translucent cover collector; the amount of solar energy that passes through the light translucent cover collector; the amount of heat that enters the solar energy collector with air.

Losses and expenses of solar energy heat collector for a selected period of time consist of loss of heat for heating a metal plate, loss of heat from the air that is removed from the collector of solar energy loss of heat for heating the translucent cover, loss of heat to the environment through horizontal and vertical located construction light translucent cover, loss of heat for heating a layer of insulation, loss of heat to the environment through the surface layer of horizontal insulation.

In spring and autumn, it is necessary to perform quantitative analysis of heat losses through the vertical surface of the insulation layer, heat-collector for heating supports and heat loss to the environment supports manifold. The results of calculating temperature change in the solar energy collector during the initial period of time at different air flow were shown. The final decision concerning the the optimum quantities of air in the installation, was adopted on the basis of joint analysis of the heat balance of solar energy collector and cameras for thermal treatment of concrete or reinforced concrete products.

Horizontal cover and lateral sides adopted transparent to the calculation model of solar energy collector. In the future, it will be necessary to analyze processes heat exchange in a plane collector on condition that sides of the collector have a different design solution.

It will be necessary to develop a system of heat balances solar energy collector, which is made of translucent cover two layers between which is a layer of air (Insulating glass).

Keywords: *solar energy collector, heated air, heat balance.*

Вступ. Використання сонячної енергії для теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів є одним із напрямів зменшення їх собівартості. Прискорення твердіння вказаних виробів за допомогою повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії, потребує розроблення відповідної установки. Кількісний аналіз процесів теплообміну, які відбуваються в колекторі сонячної енергії, є одним із факторів, котрі обумовлюють конструктивні особливості колектора й установки.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Використання сонячної енергії для прискорення твердіння бетонних та залізобетонних виробів і конструкцій здійснюється й на полігонах (у геліоформах, котрі мають світлопрозоре покриття), і в закритих цехах із застосуванням проміжного теплоносія. Дослідження різних видів геліотермообробки бетонних виробів відображено в низці робіт ([1 – 7] та ін.).

У патенті [8] запропоновано здійснювати теплову обробку гідроізольованих бетонних і залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії. За відсутності надходження сонячної енергії до колектора застосовується додаткове джерело теплоти – повітрянагрівач. Одним із факторів, що визначають інтенсивність нагрівання виробів у такій установці, є теплопродуктивність колектора сонячної енергії.

У джерелах [9, 10] наведено рекомендації для визначення теплопродуктивності певних типів колекторів сонячної енергії.

У статті [11] подано теоретичні рекомендації щодо застосування скла в геліоколекторах. Наведено методику розрахунку загального термічного опору склопакета. За цією методикою розраховано R_0 залежно від кута нахилу геліоколектора та ширини повітряного прошарку в склопакеті при заповненні його різними видами інертного газу [11]. Подані в статті рекомендації можуть бути використані при розробленні конструкцій колекторів сонячної енергії, призначених для нагрівання повітря.

У статті [3] наведено рівняння теплового балансу колектора сонячної енергії для загального випадку.

У книзі [12] докладно проаналізовано процеси теплообміну в плоскому колекторі сонячної енергії типу «лист – труба» та наведено теплові баланси для інших видів колекторів. Серед цих балансів – тепловий баланс плоского колектора сонячної енергії, в якому нагрівається повітря. Указані теплові баланси складено за умови, що режим роботи колекторів – стаціонарний. Разом з тим температурний режим плоского колектора сонячної енергії, в якому нагрівається повітря для теплової обробки бетонних виробів, – нестационарний, що необхідно враховувати.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. У статті [13] відображено розрахункову методику визначення інтенсивності нагрівання повітря в плоскому колекторі сонячної енергії. Нагріте повітря використовується для теплової обробки гідроізольованих бетонних виробів, котрі тверднуть у камері. Доцільно вдосконалити цю методику: розробити тепловий баланс теплосприймаючої металеві пластилини та шару теплоізоляції колектора.

Постановка завдання. Мета роботи – удосконалення методики визначення інтенсивності нагрівання повітря в плоскому колекторі сонячної енергії власної конструкції.

Основний матеріал і результати. Розглядається плоский колектор сонячної енергії (рис. 1).

Визначення інтенсивності нагрівання повітря в плоскому колекторі сонячної енергії здійснюється за допомогою теплових балансів світлопрозорого покриття, теплосприймаючої металеві пластилини та шару теплоізоляції, а також загального теплового балансу колектора сонячної енергії.

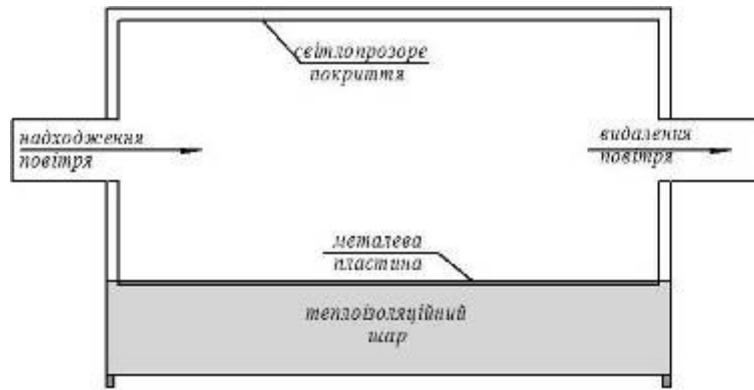


Рисунок 1 – Схема колектора сонячної енергії

Температурне поле в колекторі сонячної енергії в процесі нагрівання повітря – нестационарне. Загальний термін, упродовж якого відбувається нагрівання повітря, ділиться на проміжки часу тривалістю Δt .

Тепловий баланс світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії для i -го проміжку часу має вигляд

$$Q_A + Q_{ПС} + Q_{МСП} = Q_{СК} + Q_{СГ} + Q_{СВ}, \quad (1)$$

де Q_A – кількість сонячної енергії, що поглинається світлопрозорим покриттям колектора за i -й проміжок часу, Дж;

$Q_{ПС}$ – кількість теплоти, яка передається за i -й проміжок часу від повітря, котре рухається в колекторі сонячної енергії, до світлопрозорого покриття, Дж;

$Q_{МСП}$ – кількість теплоти, що надходить за i -й проміжок часу до світлопрозорого покриття внаслідок променевого теплообміну між металевою пластиною і цим покриттям, Дж;

$Q_{СК}$ – кількість теплоти, яка витрачається за i -й проміжок часу на нагрівання світлопрозорого покриття, Дж;

$Q_{СГ}$, $Q_{СВ}$ – кількість теплоти, що втрачається за i -й проміжок часу в навколишнє середовище через горизонтально та вертикально розташовані конструкції світлопрозорого покриття, Дж.

Схематичне відображення теплового балансу (1) світлопрозорого покриття колектора для i -го проміжку часу наведено на рис. 2.

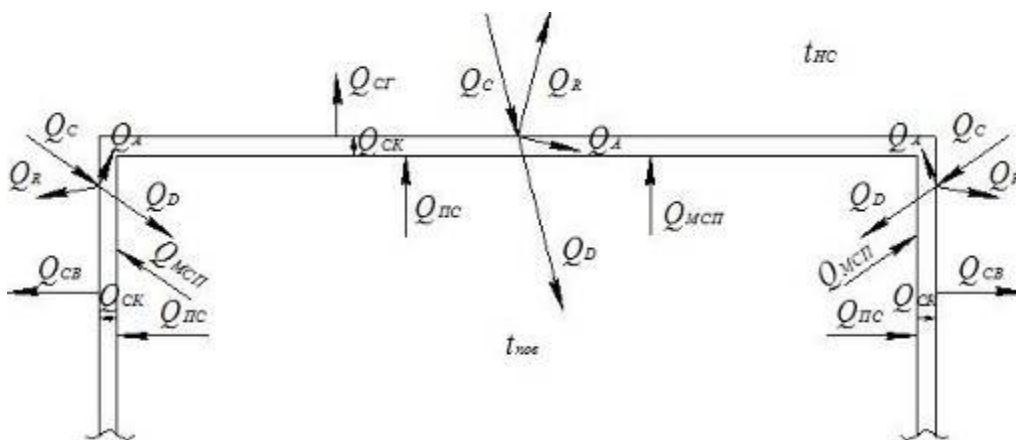


Рисунок 2 – Схематичне відображення теплового балансу (1) світлопрозорого покриття колектора для i -го проміжку часу

Якщо в певний проміжок часу температура внутрішньої поверхні світлопрозорого покриття вища, ніж температура повітря, що рухається в колекторі сонячної енергії, то тепловий баланс світлопрозорого покриття має вигляд

$$Q_A + Q_{MCP} = Q_{СП} + Q_{СК} + Q_{СГ} + Q_{СВ}, \quad (2)$$

де $Q_{СП}$ – кількість теплоти, що передається впродовж обраного проміжку часу від світлопрозорого покриття до повітря, що рухається в колекторі сонячної енергії, Дж.

Кількість теплоти, яка передається за i -й проміжок часу від повітря, котре рухається в колекторі сонячної енергії, до внутрішньої поверхні світлопрозорого покриття, Дж, обчислюється за формулою

$$Q_{ПС} = \alpha \cdot (t_{ПОВ} - t_{СВ}) \cdot F_{СВ} \cdot \Delta\tau, \quad (3)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°C);

$t_{ПОВ}$ – середня за i -й проміжок часу температура повітря в колекторі, °C;

$t_{СВ}$ – середня за i -й проміжок часу температура внутрішніх поверхонь світлопрозорого покриття, °C;

$F_{СВ}$ – площа внутрішніх поверхонь світлопрозорого покриття, м²;

$\Delta\tau$ – проміжок часу, с.

Якщо вважати, що світлопрозоре покриття прогріто рівномірно ($t_{СВ} = t_C$), тоді

$$Q_{ПС} = \alpha \cdot (t_{ПОВ} - t_C) \cdot F_{СВ} \cdot \Delta\tau, \quad (4)$$

де t_C – середня за i -й проміжок часу температура світлопрозорого покриття, °C.

Середня за i -й проміжок часу температура повітря в колекторі сонячної енергії обчислюється за рівнянням

$$t_{ПОВ} = 0,5 \cdot (t_{ПН} + t_{ПВ}), \quad (5)$$

де $t_{ПН}$, $t_{ПВ}$ – середня за i -й проміжок часу температура повітря, що надходить до колектора та видаляється з нього, °C.

Середня за i -й проміжок часу температура світлопрозорого покриття колектора сонячної енергії дорівнює

$$t_c = 0,5 \cdot (t_{СП} + t_{СК}), \quad (6)$$

де $t_{СП}$, $t_{СК}$ – температура світлопрозорого покриття на початку та наприкінці i -го проміжку часу, °C.

Кількість теплоти, що витрачається на нагрівання світлопрозорого покриття колектора за i -й проміжок часу, Дж, дорівнює

$$Q_{СК} = c_C \cdot m_C \cdot (t_{СК} - t_{СП}), \quad (7)$$

де c_C – питома масова теплоємність матеріалу світлопрозорого покриття, Дж/(кг·°C);

m_C – маса світлопрозорого покриття, кг.

Тепловий баланс теплосприймаючої металевієї пластини та шару теплоізоляції колектора сонячної енергії для i -го проміжку часу має вигляд

$$Q_D = Q_M + Q_{МП} + Q_{MCP} + Q_T + Q_{ТГ}, \quad (8)$$

де Q_D – кількість сонячної енергії, що проходить крізь світлопрозоре покриття колектора за i -й проміжок часу, Дж;

Q_M – кількість теплоти, яка витрачається на нагрівання металевієї пластини за i -й проміжок часу, Дж;

$Q_{МП}$ – кількість теплоти, що передається за i -й проміжок часу від металевієї пластини до повітря, котре рухається в колекторі, Дж.

Q_{MCP} – кількість теплоти, що передається від поверхні металевієї пластини до внутрішньої поверхні світлопрозорого покриття за i -й проміжок часу внаслідок променевого теплообміну між ними, Дж;

Q_T – кількість теплоти, яка витрачається на нагрівання шару теплоізоляції за i -й проміжок часу, Дж;

Q_{TT} – кількість теплоти, що втрачається за i -й проміжок часу в навколишнє середовище через горизонтальну поверхню шару теплоізоляції, Дж (за умови наявності цих втрат теплоти в i -й проміжок часу).

Схематичне відображення теплового балансу (8) показано на рис. 3.

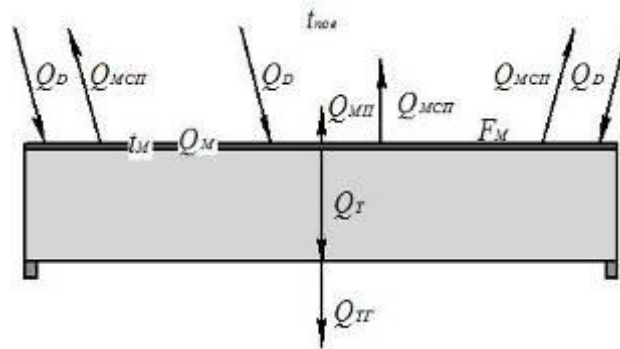


Рисунок 3 – Схематичне відображення теплового балансу (8) теплосприймаючого металевого покриття та шару теплоізоляції колектора сонячної енергії

Якщо застосування колектора сонячної енергії відбувається у весняно-осінній період, то доцільно враховувати: втрати теплоти в навколишнє середовище крізь вертикальні поверхні шару теплоізоляції; витрати теплоти на нагрівання опор; втрати теплоти в навколишнє середовище опорами.

Для весняно-осінніх періодів тепловий баланс металевієї пластини та шару теплоізоляції колектора сонячної енергії для i -го проміжку часу має вигляд

$$Q_D = Q_M + Q_{МП} + Q_{МСП} + Q_T + Q_{TT} + Q_{ТВ} + Q_{ОП} + Q_{ОПН}, \quad (9)$$

де $Q_{ТВ}$ – кількість теплоти, що втрачається за i -й проміжок часу в навколишнє середовище через вертикальні поверхні шару теплоізоляції, Дж;

$Q_{ОП}$ – кількість теплоти, яка витрачається за i -й проміжок часу на нагрівання опор, Дж (за умови наявності цих втрат теплоти в i -й проміжок часу);

$Q_{ОПН}$ – кількість теплоти, що втрачається за i -й проміжок часу в навколишнє середовище опорами, Дж (за умови наявності цих втрат теплоти в i -й проміжок часу).

Схематичне відображення теплового балансу (9) показано на рис. 4.

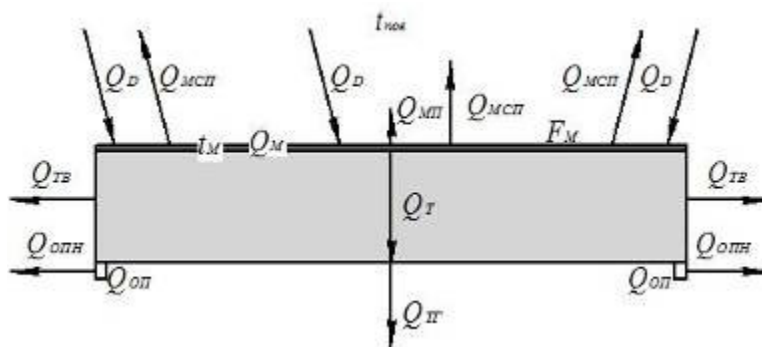


Рисунок 4 – Схематичне відображення теплового балансу (9) теплосприймаючого металевого покриття та шару теплоізоляції колектора сонячної енергії

Кількість теплоти, що передається за i -й проміжок часу від металевої пластини до повітря, котре рухається в колекторі, Дж, обчислюється за формулою

$$Q_{МП} = \alpha \cdot (t_{МЗ} - t_{ПОВ}) \cdot F_M \cdot \Delta\tau, \quad (10)$$

прийнято, що металева пластина має порівняно невелику товщину, і тому вона прогріта рівномірно, тобто $t_{МЗ} = t_M$, тоді

$$Q_{МП} = \alpha \cdot (t_M - t_{ПОВ}) \cdot F_M \cdot \Delta\tau, \quad (11)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°С);

$t_{МЗ}$ – середня за i -й проміжок часу температура зовнішньої поверхні металевої пластини, °С;

t_M – середня за i -й проміжок часу температура металевої пластини, °С;

$t_{ПОВ}$ – середня за i -й проміжок часу температура повітря в колекторі, °С;

F_M – площа металевої пластини, м²; $\Delta\tau$ – проміжок часу, с.

Кількість теплоти $Q_{МСП}$, що передається за i -й проміжок часу від металевої пластини до світлопрозорого покриття внаслідок наявності променевого теплообміну між ними, Дж, обчислюється за формулою, наведеною, зокрема, в джерелах [14, 15],

$$Q_{МСП} = \varepsilon_n \cdot c_0 \cdot \left[\left[\frac{T_{МЗ}}{100} \right]^4 - \left[\frac{T_{СВ}}{100} \right]^4 \right] \cdot F_M \cdot \Delta\tau \quad (12)$$

з урахуванням попередньо прийнятих спрощень ($T_{МЗ} = T_M$, $T_{СВ} = T_C$):

$$Q_{МСП} = \varepsilon_n \cdot c_0 \cdot \left[\left[\frac{T_M}{100} \right]^4 - \left[\frac{T_C}{100} \right]^4 \right] \cdot F_M \cdot \Delta\tau \quad (13)$$

де $T_{МЗ}$, T_M , $T_{СВ}$, T_C – абсолютні температури, К;

c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м²·К⁴);

ε_n – приведений ступінь чорноти.

Тепловий баланс колектора сонячної енергії для i -го проміжку часу має вигляд

$$Q_A + Q_D + Q_H = Q_M + Q_B + Q_{СК} + Q_{СГ} + Q_{СВ} + Q_T + Q_{ПГ}, \quad (14)$$

Q_H – кількість теплоти, що надходить до колектора сонячної енергії з повітрям упродовж i -го проміжку часу, Дж;

Q_B – кількість теплоти, яка видаляється з колектора сонячної енергії з повітрям упродовж i -го проміжку часу, Дж;

пояснення до інших складових цього теплового балансу наведено вище.

Кількість теплоти, Дж, що надходить до колектора сонячної енергії з повітрям за i -й проміжок часу, обчислюється за залежністю

$$Q_H = c_{ПН} \cdot \rho_{ПН} \cdot L \cdot t_{ПН} \cdot \Delta\tau, \quad (15)$$

де $t_{ПН}$ – середня за i -й проміжок часу температура повітря на вході до колектора, °С;

$c_{ПН}$ – питома масова теплоємність повітря при температурі $t_{ПН}$, Дж/(кг·°С);

$\rho_{ПН}$ – густина повітря при температурі $t_{ПН}$, кг/м³;

L – витрата повітря, м³/с; $\Delta\tau$ – проміжок часу, с.

Кількість теплоти, Дж, яка видаляється з колектора сонячної енергії з повітрям за i -й проміжок часу, визначається за залежністю

$$Q_B = c_{ПВ} \cdot \rho_{ПВ} \cdot L \cdot t_{ПВ} \cdot \Delta\tau, \quad (16)$$

де $t_{ПВ}$ – середня за i -й проміжок часу температура повітря на виході з колектора, °С;

$c_{ПВ}$ – питома масова теплоємність повітря при температурі $t_{ПВ}$, Дж/(кг·°С);

$\rho_{ПВ}$ – густина повітря при температурі $t_{ПВ}$, кг/м³.

У табл. 1 наведено результати обчислення зміни температури повітря в колекторі сонячної енергії впродовж перших 15 хв його використання в умовах міста Полтава в червні. Надходження сонячної радіації до поверхонь колектора визначено згідно з даними норм [16]. Прийнято: швидкість вітру біля колектора дорівнює нулю; середня за перший проміжок часу температура повітря на вході до колектора $t_{ПН} = 20^{\circ}\text{C}$. Визначено методом ітерацій (послідовних наближень) середню за перший проміжок часу температуру повітря на виході з колектора $t_{ПВ}$ при різній витраті повітря.

Таблиця 1 – Результати обчислення зміни температури повітря в колекторі сонячної енергії впродовж перших 15 хв

$L, \text{ м}^3/\text{год}$	Довжина та ширина металевої пластини, м	$t_{ПН}, ^{\circ}\text{C}$	$t_{ПВ}, ^{\circ}\text{C}$	$t_{ПВ} - t_{ПН}, ^{\circ}\text{C}$
90	1×1	20	29,5	9,5
135	1×1	20	27,5	7,5
180	1×1	20	26,3	6,3
240	1×1	20	25,2	5,2
355	1×1	20	23,9	3,9
950	1×1	20	21,8	1,8
1440	1×1	20	21,2	1,2
1880	1×1	20	21,0	1,0

Остаточне рішення стосовно оптимальної кількості повітря, що циркулює в установці, приймається на основі сумісного аналізу теплових балансів колектора сонячної енергії та камери для теплової обробки бетонних чи залізобетонних виробів.

Висновки. Відображено процеси теплообміну в плоскому колекторі сонячної енергії. Колектор є складовою частиною установки, призначеної для теплової обробки гідроізольованих бетонних виробів нагрітим повітрям.

У розрахунковій моделі колектора сонячної енергії горизонтальне покриття та бокові сторони колектора виконано з прозорого матеріалу. Надалі необхідно проаналізувати процеси теплообміну в плоскому колекторі за умови, що бокові сторони колектора мають інше конструктивне рішення.

Література

1. Заседателев И. Б. Гелиотермообработка сборного железобетона / И. Б. Заседателев, Е. Н. Малинский, Е. С. Темкин. – М. : Стройиздат, 1990. – 312 с.
2. Подгорнов Н. И. Термообработка бетона с использованием солнечной энергии / Н. И. Подгорнов. – М. : Издательство «АСВ», 2010. – 328 с.
3. Подгорнов Н. И. Термообработка бетона в опалубочных формах с использованием солнечной энергии / Н. И. Подгорнов, Т. В. Аппарович, Д. Д. Коротеев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 6. – С. 35 – 42.
4. Аруова Л. Б. Использование солнечной энергии для гелиотермообработки бетона в Республике Казахстан [Электронный ресурс] / Л. Б. Аруова, Н. Т. Даужанов. – Режим доступа: http://zimbeton.ru/article/2012_10_3.pdf.
5. Даужанов Н. Т. Малоэнергоёмкая технология термообработки изделий из пенобетона на полигонах с помощью солнечной энергии [Электронный ресурс] / Н. Т. Даужанов, Б. А. Крылов. – Режим доступа: <http://vestnikmgsu.ru/files/archive/issues/2014/3/ru/17.pdf>.

6. Пат. № 25072 KZ. МПК C04B41/00. Способ тепловой обработки строительных изделий из полистиролбетонной смеси / Н. Т. Даужанов, Л. Б. Аруова; заяв. 06.09.2010; опубл. 15.12. 2011, бюл. № 12.
7. Пат. № 2444682. Российская Федерация. МПК F24J2/02, F26B3/28. Солнечный тепловой коллектор / Л. В. Кузнецова, И. И. Полосин, Т. В. Щукина; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет ГОУВПО ВГАСУ; заяв. 09.07.2010; опубл. 10.03.2012.
8. Пат. № 83714. Україна. МПК (2013.01) F24H 3/00. Спосіб використання сонячної енергії для теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів / Т. С. Кугаєвська, В. В. Шульгін, О. В. Свінін; заявник і власник Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка; заяв. 01.04. 2013; опубл. 25.09. 2013, бюл. № 18.
9. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч.1. Отопление: справочник проектировщика / В. Н. Богословский [и др]; под ред. И. Г. Староверова и Ю. И. Шиллера. – 4-е изд. – М. : Стройиздат, 1990. – 344 с.
10. Харченко Н. В. Индивидуальные солнечные установки / Н. В. Харченко. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
11. Чорна Н. О. Застосування прозорої ізоляції та її роль в загальному теплообміні геліоколектора [Електронний ресурс] / Н. О. Чорна. – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60428/14-ChornaNEW.pdf?sequence=1>.
12. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии: пер. с англ. / Дж. А. Даффи, У. А. Бекман. – М. : Мир, 1977. – 420 с.
13. Кугаєвська Т. С. Тепловий баланс колектора сонячної енергії / Т. С. Кугаєвська, В. В. Шульгін // Науковий вісник будівництва. – Вип. 2 (80). – Х. : ХНУБА, 2015. – С. 232 – 236.
14. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.
15. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 343 с.
16. ДСТУ-Н Б В.1.1-27: 2010. Будівельна кліматологія. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 123 с.

© Кугаєвська Т.С., Шульгін В.В., Юрченко М.О.
Надійшла до редакції 24.09.2015