

### ЛІТЕРАТУРА:

1. Табунщиков Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач // М.: АВОК-ПРЕСС, 2002.– 194 с.
2. Проект Закону про енергетичну ефективність будівель 1566 від 22.12.2014 [Електронний ресурс] – Режим доступа: <http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc34?id=&pf3511=53059&pf35401=320609>
3. Демченко В.В. Методи підвищення енергоефективності будівлі / В.В. Демченко, Х.М. Чуприна, О.В. Невмержицький // Управління розвитком складних систем, 2013. – Вип. 16. – С.138-143.
4. Волощук В. А. Визначення тепловтрат будівель з урахуванням впливу швидкості вітру та проходу сонячної радіації / В. А. Волощук, А. М. Рокочинський // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування, 2002. – Вип. 2(34). Частина 2. – С. 182 – 191.
5. Панферов С.В. Некоторые проблемы энергосбережения и автоматизации в системах теплоснабжения зданий / С.В. Панферов, А.И. Телегин, В.И. Панферов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2010. – Вып. 22 (198). С. 79-86.
6. Siemens Building Management Systems [Електронний ресурс] – Режим доступа: <http://www.buildingtechnologies.siemens.com/bt/global/en/Pages/home.aspx>.
7. Honeywell Building Management Systems [Електронний ресурс] – Режим доступа: <https://buildingsolutions.honeywell.com/en-US/Pages/default.aspx>.
8. Сизова Н.Д. Кроссплатформенное программное обеспечение в технологии строительных материалов / Н.Д. Сизова, И.А. Михеев // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2014. – Вып. 167 – С.20-25.

УДК 666.972: 621.8.035

Кугасвська Т.С., Шульгін В.В.

*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

### ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС КОЛЕКТОРА СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

**Вступ.** Застосування сонячної енергії для прискорення твердіння бетонних і залізобетонних виробів дозволяє зменшити їх собівартість. У патенті [1] наведено спосіб теплової обробки цих виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії. Упровадження у виробництво зазначеного способу потребує низки експериментальних і теоретичних досліджень.

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** У статті [2] аналізуються особливості процесу теплової обробки бетонних виробів при їх нагріванні сонячною енергією в опалубочних формах. У цій статті підкреслюється, що вказані форми за своїм конструктивним рішенням і теплофізичними процесами схожі з низькопотенційними сонячними нагрівачами. Різниця полягає лише в тому, що тепло сприймають не пристрої «труба в листі» чи «труба у вигляді змієвика», а бетон, який твердіє. У джерелі [3] розглянуто

особливості прискорення твердіння бетонних виробів із застосуванням геліотермообробки з проміжним теплоносієм. У статті [4] наведено спосіб прискорення твердіння виробів із пінобетону шляхом геліопрогрівання на полігонах. У джерелі [5] показано, зокрема, зміну температури бетонних виробів під час їх геліотермообробки, а також – конструктивні особливості відповідного обладнання. У статті [6] наведено результати лабораторних досліджень теплової обробки зразків із важкого бетону за допомогою нагрітого в колекторі сонячної енергії повітря.

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Загальна мета досліджень – створення методу прогнозування інтенсивності твердіння бетонних і залізобетонних виробів при їх тепловій обробці нагрітим в колекторі сонячної енергії повітрям. У відповідних лабораторних дослідженнях (частину яких представлено в джерелі [6]) використовувався колектор сонячної енергії власної

конструкції. Ці дослідження дозволяють створити колектор сонячної енергії подібної конструкції для камер з більшою продуктивністю. Для аналізу впливу на теплопродуктивність такого колектора нових конструктивних рішень та різних кліматичних умов необхідна наявність відповідної розрахункової методики.

**Постановка завдання.** Мета роботи – розроблення розрахункової методики прогнозування інтенсивності нагрівання повітря в плоскому колекторі сонячної енергії.

**Основний матеріал і результати.** Розглядається плоский колектор сонячної енергії, в якому нагрівається повітря для подальшого його використання в процесі теплової обробки бетонних виробів. Повітря рухається в просторі між прозорим покриттям і теплосприймаючим шаром. Між теплосприймаючим шаром і корпусом колектора розташовано теплоізоляційний шар. Нагріте в колекторі сонячної енергії повітря за допомогою вентилятора спрямовується в камеру, призначену для теплової обробки бетонних виробів. У камері повітря віддає певну частку теплоти виробам, які знаходяться у закритих формах, і повертається до колектора сонячної енергії. Слід підкреслити, що додатковим джерелом теплоти в камері є екзотермічні реакції гідратації цементу.

При складанні теплового балансу колектора сонячної енергії враховано, що з прозорого матеріалу сконструйовано не лише покриття колектора, а також – його бокові сторони; (в експериментальних дослідженнях, наведених в статті [6] використано колектор сонячної енергії власної конструкції, в якому прозорим є тільки його горизонтальне покриття).

Сонячна енергія надходить до прозорих конструкцій колектора. Частина цієї енергії поглинається прозорими конструкціями, частина – відбивається, а ще одна частина проходить крізь ці поверхні:

$$Q_H = Q_{ПГ} + Q_V + Q_{ПР}, \quad (1)$$

де  $Q_H$  – кількість променевої енергії, що надходить за вибраний проміжок часу до прозорих конструкцій колектора, Дж;  $Q_{ПГ}$ ,  $Q_V$ ,  $Q_{ПР}$  – кількість променевої енергії, що за вибраний проміжок часу поглинається

прозорими конструкціями колектора, відбивається ними та проходить крізь них, Дж.

Сонячна енергія  $Q_{ПГ}$ , яка поглинається прозорими огорожувальними конструкціями колектора за вибраний проміжок часу:

– витрачається на нагрівання цих прозорих конструкцій ( $Q_1$ ); нагріті прозорі конструкції внаслідок конвективного теплообміну передають частку теплоти ( $Q_2$ ) повітря, яке рухається в колекторі; частка теплоти ( $Q_3$ ) втрачається прозорими конструкціями в навколишнє середовище;

– надходить до теплосприймаючої поверхні колектора і частково поглинається цією поверхнею, а частково відбивається.

Сонячна енергія  $Q_{ПР}$ , яка проходить крізь прозорі конструкції колектора за вибраний проміжок часу, надходить до теплосприймаючої поверхні колектора і частково поглинається нею, а частково відбивається.

Процес променевого теплообміну між внутрішніми поверхнями колектора обумовлюється потоком результуючого випромінювання  $Q_P$ .

Енергія потоку результуючого випромінювання  $Q_P$ :

– витрачається на нагрівання теплосприймаючого шару ( $Q_4$ ); теплосприймаюча поверхня внаслідок конвективного теплообміну передає частку теплоти ( $Q_5$ ) повітря, що рухається в колекторі;

– витрачається на нагрівання шару теплоізоляції ( $Q_6$ ); у початкові проміжки часу вказана складова може бути відсутня;

– витрачається на нагрівання конструктивного шару колектора ( $Q_7$ ); у початкові проміжки часу ця складова відсутня;

– втрачається в навколишнє середовище через зовнішню поверхню конструктивного шару ( $Q_8$ ); у початкові проміжки часу ця складова відсутня; бажано, щоб конструкція колектора сонячної енергії була такою, при якій  $Q_7 = 0$  і  $Q_8 = 0$  впродовж усього періоду теплової обробки бетонних виробів.

Таким чином

$$Q_{ПГ} + Q_{ПР} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_P, \quad (2)$$

$$\text{де } Q_P = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8, \quad (3)$$

тоді

$$Q_{\text{пг}} + Q_{\text{пр}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8. \quad (4)$$

Кількість променевої енергії, що надходить за вибраний проміжок часу до прозорих поверхонь колектора, визначається відповідно до рекомендацій джерел [7-8].

Кількість теплоти  $Q_1$ , Дж, що витрачається на нагрівання прозорих огорожувальних конструкцій колектора за вибраний проміжок часу, дорівнює

$$Q_1 = c_c \cdot m_c \cdot (t_{\text{СК}} - t_{\text{СП}}), \quad (5)$$

де  $c_c$  – питома масова теплоємність прозорого матеріалу, Дж/(кг·°C);  $m_c$ ,  $t_{\text{СП}}$ ,  $t_{\text{СК}}$  – відповідно маса, кг, та початкова і кінцева для вибраного проміжку часу температура прозорих огорожувальних конструкцій колектора, °C.

Кількість теплоти  $Q_2$ , Дж, що передається за вибраний проміжок часу внаслідок конвективного теплообміну від внутрішніх поверхонь прозорих конструкцій до повітря, що рухається в колекторі, дорівнює:

$$Q_2 = \alpha_1 \cdot (t_c - t_{\text{П}}) \cdot F_1 \cdot \tau, \quad (6)$$

де  $\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі від внутрішніх поверхонь прозорих конструкцій до повітря, що рухається в колекторі, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $F_1$  – площа внутрішньої поверхні прозорих конструкцій колектора, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – проміжок часу, с;  $t_c$  – середня за вибраний проміжок часу температура внутрішніх поверхонь прозорих конструкцій колектора, °C; приймається спрощення – прозорі конструкції нагріто рівномірно, тоді середня за вибраний проміжок часу температура внутрішніх поверхонь прозорих конструкцій дорівнює середній за вибраний проміжок часу температурі прозорих конструкцій, котра визначається за рівнянням

$$t_c = 0,5 \cdot (t_{\text{СП}} + t_{\text{СК}}); \quad (7)$$

де  $t_{\text{П}}$  – середня за вибраний проміжок часу температура повітря  $t_{\text{П}}$ , °C, яка обчислюється за рівнянням:

$$t_{\text{П}} = 0,5 \cdot (t_{\text{ПП}} + t_{\text{ПК}}), \quad (8)$$

$t_{\text{ПП}}$ ,  $t_{\text{ПК}}$  – температура повітря відповідно на вході до колектора на початку вибраного проміжку часу та на виході з колектора наприкінці вибраного проміжку часу, °C.

Кількість теплоти  $Q_3$ , Дж, що витрачається в навколишнє середовище прозорими конструкціями, за умови, що температура зовнішніх поверхонь цих конструкцій вища,

ніж температура навколишнього середовища, обчислюється за залежностями, які наведено, зокрема, в джерелі [9].

Кількість теплоти  $Q_4$ , Дж, що витрачається на нагрівання теплосприймаючого шару колектора за вибраний проміжок часу, дорівнює

$$Q_4 = c_T \cdot m_T \cdot (t_{\text{ТК}} - t_{\text{ТП}}), \quad (9)$$

де  $c_T$  – питома масова теплоємність теплосприймаючого матеріалу, Дж/(кг·°C);  $m_T$ ,  $t_{\text{ТП}}$ ,  $t_{\text{ТК}}$  – відповідно маса, кг, та початкова і кінцева для вибраного проміжку часу температура теплосприймаючого шару, °C; цей шар може прогріватися по товщині поступово, що слід враховувати.

Кількість теплоти  $Q_5$ , Дж, що передається за вибраний проміжок часу від поверхні теплосприймаючого шару до повітря, яке рухається в колекторі, дорівнює

$$Q_5 = \alpha_2 \cdot (t_T - t_{\text{П}}) \cdot F_2 \cdot \tau, \quad (10)$$

де  $\alpha_2$  – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні теплосприймаючого шару до повітря, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $F_2$  – площа поверхні теплосприймаючого шару, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – проміжок часу, с;  $t_T$  – середня за вибраний проміжок часу температура поверхні теплосприймаючого шару; приймається спрощення – теплосприймаючий шар нагріто рівномірно, тоді середня за вибраний проміжок часу температура поверхні теплосприймаючого шару дорівнює середній за вибраний проміжок часу температурі теплосприймаючого шару, яка обчислюється за рівнянням

$$t_T = 0,5 \cdot (t_{\text{ТП}} + t_{\text{ТК}}). \quad (11)$$

При визначенні критерію Нуссельта (який використовується при обчисленні коефіцієнта тепловіддачі) допускається для повітря не застосовувати поправку, яка враховує напрямок теплового потоку [9].

Кількість теплоти  $Q_6$ , що витрачається на нагрівання шару теплоізоляції за вибраний проміжок часу, обчислюється з урахуванням залежностей, які характеризують процес нестационарної теплопровідності.

Нижче наведено алгоритм визначення температури повітря на виході з колектора сонячної енергії наприкінці початкового проміжку часу  $t_{\text{ПК}}$ . Прийнято, що в початковий період втрати теплоти  $Q_3$  та витрати теплоти  $Q_6$  незначні, і ними нехтуємо. Крім того, для початкового проміжку часу  $Q_7 = 0$ ,  $Q_8 = 0$ .

Застосовується метод ітерацій (послідовних наближень).

1. Приймається орієнтовне значення температури повітря на виході з колектора наприкінці початкового проміжку часу  $t_{ПК}$ .

2. Обчислюється за рівнянням (8) середня за вибраний проміжок часу температура повітря  $t_{П}$ , °С.

3. Витрати теплоти на нагрівання повітря в колекторі сонячної енергії за початковий проміжок часу можна визначити за формулами

$$Q_2 + Q_5 = \alpha_1(t_C - t_{П}) \cdot F_1 \cdot \tau + \alpha_2(t_{Г} - t_{П}) \cdot F_2 \cdot \tau; \quad (12)$$

$$Q_2 + Q_5 = c_{П} \cdot G_{П} \cdot (t_{ПК} - t_{П}) \cdot \tau; \quad (13)$$

тоді

$$\alpha_1(t_C - t_{П})F_1\tau + \alpha_2(t_{Г} - t_{П})F_2\tau = c_{П}G_{П}(t_{ПК} - t_{П})\tau, \quad (14)$$

де  $c_{П}$  – питома масова теплоємність повітря, Дж/(кг·°С);  $G_{П}$  – кількість повітря, що проходить через колектор за одиницю часу, кг/с.

Визначається залежність температури  $t_{Т}$  та температури  $t_{ТК}$  (рівняння (11)) від інших складових рівняння (14).

4. Обчислюються величини  $Q_{ПГ}$ ,  $Q_{ПР}$ .

5. Рівняння (3) спрощується з урахуванням того, що  $Q_3=0$ ,  $Q_6=0$ ,  $Q_7=0$ ,  $Q_8=0$ :

$$Q_{ПГ} + Q_{ПР} = Q_1 + Q_2 + Q_4 + Q_5. \quad (15)$$

тоді

$$Q_{ПГ} + Q_{ПР} = c_{ПГ}m(t_{ТК} - t_{СП}) + \alpha_1(t_C - t_{П}) \cdot F_1 \cdot \tau + c_{ПТ}m_{Т}(t_{ТК} - t_{П}) + \alpha_2 \cdot (t_{Г} - t_{П}) \cdot F_2 \cdot \tau. \quad (16)$$

У рівнянні (16) температури  $t_{ТК}$ ,  $t_{Т}$  замінюються відповідними математичними залежностями, отримання яких пояснено в п. 3.

Використовується рівняння (7) для того, щоб у формулі (16) замінити температуру  $t_{СК}$  відповідною математичною залежністю із застосуванням температури  $t_C$ .

За допомогою рівняння (16) визначається температура  $t_C$ .

6. Обчислюється потік результуючого випромінювання  $Q_{Р}$  між внутрішніми поверхнями колектора:

$$- \text{за формулою } Q_{Р} = Q_4 + Q_5, \quad (17)$$

- за формулою, що відображає променевий теплообмін між двома поверхнями в замкнутому просторі; цю формулу наведено, зокрема, в джерелі [9].

Якщо величини  $Q_{Р}$ , отримані за вказаними формулами, не співпадають, то зада-

ються новим значенням температури повітря  $t_{ПК}$  на виході з колектора наприкінці початкового проміжку часу і повторюють обчислення.

**Висновки.** Розроблено розрахункову методику прогнозування інтенсивності нагрівання повітря в плоскому колекторі сонячної енергії. Нагріте повітря використовується для теплової обробки бетонних виробів, котрі твердіють в камерах у закритих формах.

У подальших дослідженнях необхідно за допомогою наведеної методики проаналізувати вплив на теплопродуктивність колектора нових конструктивних рішень та різних кліматичних умов.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. 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.
2. Подгорнов, Н.И. Термообработка бетона в опалубочных формах с использованием солнечной энергии / Н.И. Подгорнов, Т.В. Аппарович, Д.Д. Коротеев // Известия вузов. Строительство.– Новосибирск: НГАСУ, 2009. – № 6. – С. 35 – 42.
3. 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](http://zimbeton.ru/article/2012_10_3.pdf).
4. 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>.
5. Щукина, Т.В. Гелиотермообработка с использованием средств повышения энергооблучённости строительных изделий [Электронный ресурс] / Т.В. Щукина, Е.Ю. Семёнова. – Режим доступа: [http://www.rus-nauka.com/28\\_NII\\_2012/Tecnic/5\\_118020.doc.htm](http://www.rus-nauka.com/28_NII_2012/Tecnic/5_118020.doc.htm).
6. Кугаєвська, Т.С. Лабораторні дослідження теплової обробки бетонних зразків нагрітим повітрям / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін // Науковий вісник будівництва. Випуск

- 4 (78). – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2014. – С. 276 – 283.
7. Внутренние санитарно-технические устройства: справочник в 3-х частях. Ч. 1. Отопление / под ред. И.Г. Староверова и Ю.И. Шиллера. – М.: Стройиздат, 1990. – 344 с.
8. Харченко, Н.В. Индивидуальные солнечные установки / Н.В. Харченко. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
9. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 343 с.

УДК 533.6.013.11

**Грязнова С. А.**

*Харківський національний університет міського господарства*

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗДУХООБМЕНА В ТОННЕЛЯХ МЕТРОПОЛИТЕНА С УЧЕТОМ ПОРШНЕВОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ**

Проблема пассажирских перевозок современных крупных городов решается за счет применения скоростных систем – метрополитенов, обеспечивающих высокую скорость, надежность, безопасность и способность перевозить пассажиропотоки, превосходящие возможности других видов городского транспорта. Для решения данной проблемы необходимы эффективные схемы проветривания тоннелей и станций по удалению избыточного тепла, расчета необходимого количества воздуха для вентиляции участков трассы с использованием текущей информации о состоянии воздушной среды в метрополитене [1].

**Анализ последних достижений и публикаций** существующих методов расчета необходимого количества воздуха, разработанных В.С. Казаковым [2], В.Я. Цодиковым [3,4] и др., показал, что эти методы либо вовсе не учитывают рециркуляцию воздуха в сети тоннелей, либо учитывают ее недостаточно точно, вследствие чего результаты расчетов по анализируемым зависимостям отличаются между собой на 100 – 400%. Расчет скорости циркуляционных потоков воздуха, возникающих в тоннелях при движении поездов, производится по формулам Г.Н.Абрамовича [5] с учетом эмпирических коэффициентов, полученных В.Я.Цодиковым [3,4]. Однако эти зависимости не учитывают соединения тоннелей вентиляционными сбойками, вследствие чего скорости и объемы циркуляционного воздуха

определяются недостаточно точно. Поршневой эффект, возникающий в тоннелях при интенсивном движении поездов, создает нестационарный режим течения воздушных потоков, влияющий на работу тоннельных вентиляторов. Однако ни одна из существующих методик расчета потребного воздухообмена этого не учитывает.

Таким образом, становится очевидным, что многообразие применяемых схем проветривания и методов расчета не позволяют достаточно обоснованно определять потребный воздухообмен на участках трассы метрополитена. Поэтому необходимо проводить дальнейшие исследования по совершенствованию схем и методов расчета проветривания метрополитенов, что будет способствовать обеспечению на станциях и в тоннелях нормальных гигиенических условий воздушной среды и повышению безопасности движения.

Воздухообмен внутри тоннеля метрополитена является одним из основных факторов, определяющих санитарно-гигиенические условия метрополитена. При интенсивном движении поездов и значительных пассажиропотоках состояние воздушной среды метрополитена зависит от количества выделяющихся газов, пыли, влаги и тепла. Основными источниками углекислого газа в метрополитене являются пассажиропоток и обслуживающий персонал. Пыль в подземных сооружениях образуется в результате выветривания железобетонных тоннельных обделок, бетонного