

УДК 620.92

М.О. Любович (Інститут Енергозбереження та енергоменеджменту, Київ)

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ РІЗНИХ ТИПІВ  
ДЛЯ БУДІВЕЛЬ З УРАХУВАННЯМ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК  
ОБ'ЄКТУ**

*Наведено аналіз впливу різних природних і технічних факторів на розробку пропозиції впровадження теплонасосних станцій для різних будівель. Методика аналізу спирається на статистичні дані гідрометцентру та реальні технічні характеристики діючого об'єкту.*

*Приведен анализ влияния различных природных и технических факторов на разработку предложения внедрения теплонасосных станций для различных зданий. Методика анализа базируется на статистических данных гидрометцентра и реальных технических характеристиках действующего объекта.*

*The analysis of the impact of various natural and technical factors for the development of proposals for the introduction of heat pump stations of various buildings. Methodology is based on statistical data and real Hydrometeorological Center specifications of existing facilities.*

На сьогоднішній день світова наука вже дуже багата на різноманітні інноваційні енергозберігаючі технології. Однак проблема ефективного використання енергозберігаючих технологій залишається надзвичайно актуальною не лише для України, але й для всіх без виключення розвинених країн світу. На жаль, цьому питанню в нашій країні досі приділяється вкрай мало уваги, якщо не ігнорується зовсім. Не зважаючи на вже сьогодні відчутний негативний вплив неефективного енергокористування у цілому світі, у нашій країні схоже ніби бояться щось змінювати. Але існують шляхи до значного поліпшення ситуації, що вже пройшли солідну перевірку часом у розвинених країнах світу. Один з цих реальних і діючих шляхів – використання низькопотенційного тепла доквілля, тобто влаштування теплонасосних станцій, призначених для одночасного опалення, гарячого водопостачання та кондиціонування. Такі системи вже давно успішно застосовуються у Швеції, Німеччині, США, Японії, Австрії та інших розвинених країнах світу, проте актуальним залишається питання щодо підвищення ефективності їх роботи. Можливими шляхами до цього можуть бути зокрема сумісне використання теплових насосів і традиційних енергетичних джерел, використання системи, побудованої на кількох сучасних приладах, що використовують поновлювану енергію декількох джерел (грунт, вітер, сонце тощо), переохолодження конденсату у теплових насосах і т.п.

Нині ринок теплових насосів у Європі невпинно зростає, але він головним чином орієнтується на будівельну галузь, так як саме на стадії проектування нового об'єкту перед розробником стоїть не просто можливість, а обов'язок закласти енергоефективний і перспективний проект. Однак, коли мова йде про вже реалізовані будівлі, то тут багато залежить від ініціативи відповідальної людини. На жаль, таких ініціаторів у нашій країні практично нема. Гадаю, що основна причина цьому – не просто відсутність переконливих методик вибору енергоефективного обладнання, а недостатня адаптація і гнучкість цих методик в умовах широкого різномайття кліматичних і технічних характеристик кожного окремого прикладу ділянки. Більшість методик розробки пропозиції тепло насосної станції ґрунтується на спрощених інженерних розрахунках. Проте існує дуже багато факторів, що в тих чи інших умовах можуть суттєво вплинути на результат дослідження, в той час як для іншого регіону ці фактори істотного впливу не чинять. З огляду на розширення можливостей у зборі інформації, зокрема по кліматичним показникам, на мою думку, доцільно було б переглянути методики у бік більш точного урахування кліматичних умов місцевості.

Саме тому метою мого дослідження є аналіз впливу факторів навколишнього середовища та технічних особливостей заданого об'єкту для впровадження теплонасосної установки. Я вважаю, що врахування досі недостатньо опрацьованих факторів може позитивно вплинути на рішення відповідальних людей щодо модернізації давно введених в експлуатацію об'єктів. А це величезний потенціал для енергозбереження.

Отже, визначимо головні фактори, що можуть впливати на вибір теплового насоса. Головним чином, це:

- Кліматичні умови;
- Технічні характеристики досліджуваного об'єкту;
- Власне, тип обладнання, що ми потенційно збираємося застосовувати.

Якщо розглядати докладніше, то можна переконатися, що кліматичні умови і технічні характеристики об'єкту дуже взаємопов'язані. З цією метою звернімо увагу на докладний перелік факторів, що я враховуватиму при аналізі їх впливу на ефективність вибору і користування енергозберігаючим обладнанням. Зокрема, такими є:

- Теплопровідність огорожуючих конструкцій;
- Площа застелення сонячної сторони будівлі;
- Кількість перебуваючих у приміщеннях людей, їх ступінь фізичної активності;
- Вентиляційна система;
- Форма будівлі;
- Конкретні метеорологічні умови у опалювальний період;
- Тип вибраного нами обладнання.

Визначимо перелік даних, необхідних для аналізу цих факторів:

- Геометричні розміри об'єкту (параметри стін, вікон, форми приміщень);
- Теплофізичні характеристики матеріалів, з яких виготовлено будівлю;
- Кількість людей, що постійно перебувають у приміщеннях, тяжкість їхньої роботи, час, що вони перебувають у будівлі;
- Дані про вентиляційну систему, за наявності такої;
- Статистичні дані гідрометцентру про що півгодинні метеоумови у районі досліджуваного об'єкту (температура, хмарність);
- Тип теплонасосної установки (повітряна, ґрунтовий зонд)
- Характеристика ґрунтів даної місцевості.

Для аналізу вищенаведених факторів необхідно щонайперше побудувати докладну модель досліджуваного об'єкту. Все починається з теплового розрахунку будівлі, метою якого являється побудова теплової характеристики будівлі, що є опорною у визначенні теплового навантаження об'єкту.

Задача розрахунку теплового балансу будівлі давно відома: На сьогодні для її вирішення існує багато різних методик. В Україні, наприклад, потужність систем опалення та теплові мережі проектуються з розрахунку на тривалу роботу при температурі найбільш холодної п'ятиденки [1]. Проте це означає, що більшість часу така система працює недовантажена, що є неприпустимо для систем теплопостачання на альтернативних енергоносіях. У роботах [3, 4] описані більш точні методики розрахунку та розроблені на їх основі комп'ютерні програми для динамічного визначення тепловтрат, створені канадською компанією RETScreen та американською асоціацією ASHRAE відповідно. Однак жодна з

даних програм не позбавлена недоліків. У них, зокрема, нехтується геометричними характеристиками будівель та термодинамічними характеристиками огорожуючих конструкцій, наближено визначається площа стін та вікон тощо.

Враховавши перераховані недоліки, була розроблена спеціалізована розрахункова методика для моделювання теплового режиму різних по формі та призначенню будівель. Ця методика є опорною для подальшого аналізу факторів впливу.

На першому етапі необхідно отримати план досліджуваного об'єкту з детальними геометричними розмірами. Будівля розбивається на окремі приміщення і для кожного з них розраховуються тепловтрати через огорожуючі конструкції для певної розрахункової температури:

$$Q_k = (t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}}) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{k_{\text{покр}} \cdot k_{\text{к.с.}} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \sum_{j=1}^m \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_{\text{зовн}}} \right)}; \quad (1)$$

де  $Q_k$  - теплові втрати і-го приміщення досліджуваної будівлі, Вт;

$t_{\text{вн}}$  - цільова температура всередині приміщення, °С;

$t_{\text{зовн}}$  - розрахункова температура на вулиці, °С;

$S_i$  - площа і-го виду огорожуючої конструкції, що виходить назовні, м<sup>2</sup>;

$k_{\text{покр}}$  - коефіцієнт поверху, безрозмірний;

$k_{\text{к.с.}}$  - коефіцієнт кількості зовнішніх стін, безрозмірний;

$\alpha_{\text{вн}}$  - коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні, Вт/(м<sup>2</sup>°С);

$\alpha_{\text{зовн}}$  - коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні, Вт/(м<sup>2</sup>°С);

$\delta_j$  - товщина j-го шару огорожуючої конструкції виду і, м;

$\lambda_j$  - коефіцієнт теплопровідності j-го шару огорожуючої конструкції виду і, Вт/(м<sup>2</sup>°С).

А також визначаємо втрати тепла через вентиляцію за відомою формулою:

$$Q_B = C_x \cdot V \cdot \rho \cdot N \cdot 3,6 \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}}) \quad (2)$$

де  $C_x$  - питома теплоємність повітря, кДж/(кг К);

$V$  - об'єм приміщень, що вентилуються, м<sup>3</sup>;

$\rho$  - густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$N$  - кратність заміни повітря, год<sup>-1</sup>;

Таким чином можемо отримати повні тепловтрати будівлі, що залежать лише від перепаду температури зовні і всередині приміщення:

$$Q(\Delta T) = \frac{(Q_B + \sum_{k=1}^n Q_k)}{(t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}})} \cdot \Delta T \quad (3)$$

де  $\Delta T$  - перепад температур між цільовою в приміщенні і зовнішньою.

Також, як відомо у приміщеннях можуть знаходитись різноманітні джерела тепла, що власне у деяких випадках можуть суттєво вплинути на результат. Якщо, наприклад ми розглядаємо громадські приміщення, скажімо, школу, то очевидно, що впродовж всього

періоду доби, коли необхідно підтримувати цільову температуру у класах, можна спостерігати наявність там великої кількості дітей різного віку, що в сукупності можуть являти собою істотне і постійне джерело тепла. У таких випадках враховуємо тепловиділення людей, з урахуванням часу перерви та уроку, міри зайнятості і віку дитини:

$$Q_{\text{л}} = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i \cdot k_{\text{вік } i}) \cdot (t_{\text{ур}} \cdot q_{\text{ур}} + t_{\text{пер}} \cdot q_{\text{пер}})}{t_{\text{ш}}} \cdot N_{\text{у}} + N_{\text{вчителі}} \cdot q_{\text{вчителі}} \quad (4)$$

де  $a_i$  – частка учнів у школі  $i$ -го віку;

$k_{\text{вік } i}$  – поправочний коефіцієнт тепловиділення, що враховує вік людини;

$t_{\text{ур}}$  – сумарний час уроків на день, год;

$q_{\text{ур}}$  – тепловиділення людини при розумовому навантаженні, кВт;

$t_{\text{пер}}$  – сумарний час перерв на день, год;

$q_{\text{пер}}$  – тепловиділення людини при легкому фізичному навантаженні, кВт;

$t_{\text{ш}}$  – сумарний час на день, що діти проводять в школі, год;

$N_{\text{у}}$  – кількість учнів у школі;

$N_{\text{вчителі}}$  – кількість вчителів у школі;

$q_{\text{вчителі}}$  – тепловиділення людини при легкому фізичному навантаженні, кВт.

Тоді теплова характеристика школи приймає вигляд:

$$Q_{\text{ш}}(\Delta T) = \frac{(Q_{\text{в}} + \sum_{k=1}^l Q_k)}{(t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}})} \cdot \Delta T + Q_{\text{л}} \quad (5)$$

На базі цих розрахунків мною було проведено дослідження школи у Броварах, де я вчилась. І вже на цьому етапі мені вдалось отримати цікаві результати. Так наприклад, для класичних інженерних розрахунків напевно би нехтувалося теплом від дітей. Однак розрахунки дали, що це внесло би у випадку школи суттєву похибку. При зовнішній температурі взимку  $-15^{\circ}\text{C}$  потужність теплового випромінювання від дітей сягала 15% від необхідної теплової потужності для отримання цільової температури в приміщеннях з урахуванням неповної присутності дітей, а при  $0^{\circ}\text{C}$  похибка могла б становити 30%. При виборі традиційних систем опалення, що тривалий час можуть працювати недовантаженими, можливо такою похибкою і знехтували б, але при розрахунку опалення на поновлюваних джерелах це абсолютно неприпустимо.

Також у разі наявності у приміщеннях тепловиділяючого обладнання, і за можливості обліку кількості виділеного ним тепла, теж необхідно враховувати цю складову у тепловій характеристиці. Це не стосується школи, де з електроприладів у класах є лише люмінесцентні лампи, однак на об'єктах, насичених споживачами, цей фактор може бути суттєвим.

Проаналізуємо тепер вплив будівельних характеристик об'єкту на його тепло споживання. Звісно, коли зводиться новий проект, то зазвичай він використовує сучасні вже недорогі але дуже якісні з точки зору ізоляції матеріали. Тепловтрати таких будівель при  $-20^{\circ}\text{C}$  зазвичай менші за  $0,06 \text{ кВт/м}^2$ , чого не скажеш про стару, але досі діючу забудову. З використанням (5) на прикладі вищезгаданої школи я отримала питомі тепловтрати на рівні  $0,084 \text{ кВт/м}^2$ . Враховуючи значні розміри подібних громадських будівель можна легко переконатися в доцільності застосування попереднього зовнішнього утеплення стін, до установки теплонасосної станції. Для розрахунку нової теплової характеристики будівлі використаємо формули (1)-(5) додавши у (1)  $(m+1)$ -й шар стіни і його характеристики. Моє дослідження на базі школи показало, що такий захід може зменшити питомі тепловтрати до  $0,062 \text{ кВт/м}^2$ , що більш як на чверть економить тепло на опалення.

Практика показує, що модернізуючи об'єкти часто є сенс застосовувати біваленту схему теплозабезпечення, позаяк вона дає змогу забезпечити максимальне завантаження теплового насоса впродовж всього опалювального сезону, що відчутно зменшує

капіталовкладення по проекту, але незначно піднімає подальші експлуатаційні витрати. Проілюструвати це можливо провівши розрахунок з використанням статистики реальних метеоумов за найближчий опалювальний сезон. Для цього будується розподіл щопівгодинних температур, що мали місце за розрахунковий період. На Рис.1 зображений такий розподіл для опалювального періоду 2009-2010 років.

Використовуючи цей розподіл і формулу (5) обраховуємо потребу в теплі впродовж всього розрахункового періоду, кВт год:

$$W_{\text{тепл}} = \frac{\sum_{i=-20}^{15} N_i^* \cdot 0,5 \cdot Q_{\text{ш}} \cdot (t_{\text{вн}} - t)}{1000} \quad (6)$$

де  $N_i^*$  - кількість півгодинних проміжків часу, протягом яких була зафіксована температура  $i$ .

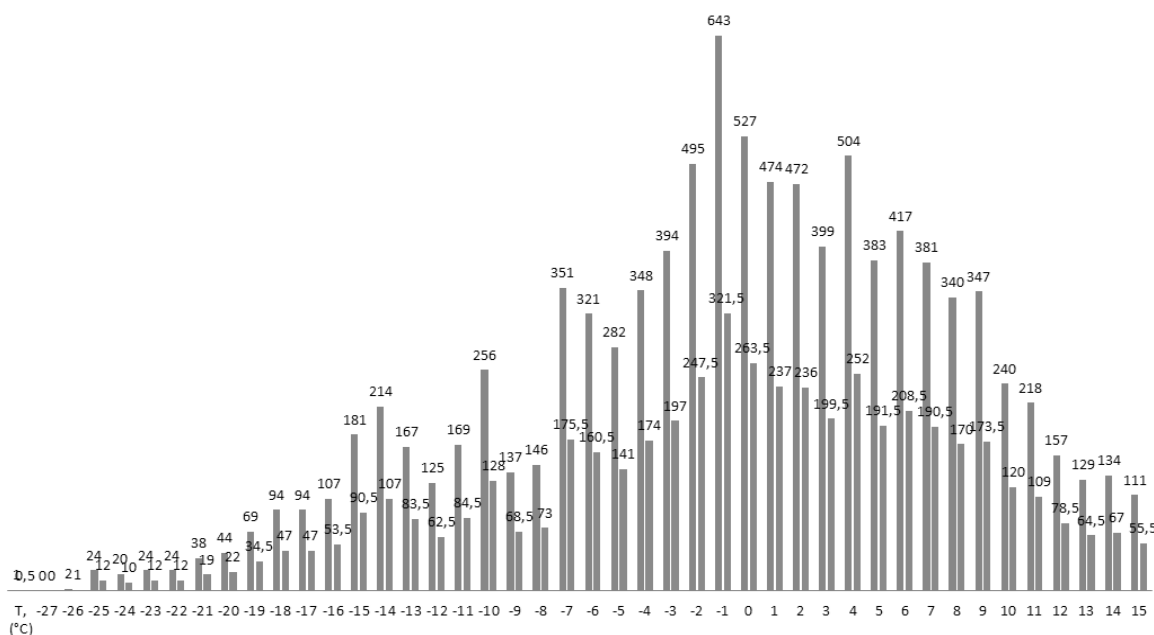


Рис.1 – Розподіл щопівгодинних температур за період 1.10.09-30.04.10.

Також визначається максимальна необхідна теплова потужність, виходячи з найнижчої за період температури з використанням формули (5). Тепер задаючись різними значеннями частки потужності, що буде покриватися за рахунок відновлювальних джерел, необхідно здійснити пошук рішення, що забезпечить мінімум цільового витратного фактора. В моєму дослідженні я використала з цією метою термін окупності. В ході дослідження було отримано наступні цікаві результати. Не зважаючи на нижчі капіталовкладення по варіанту повітряного теплового насосу, продуктивність його була недостатньою, що забезпечити переконливий економічний ефект у випадку модернізації достатньо старої будівлі, і виявилось, що з урахуванням особливостей ґрунту даної місцевості найкращим варіантом є встановлення ґрунтового зондового теплового насосу типу «розсіл – вода», що забезпечило термін окупності менше 6,5 років. При чому тепловий насос було вибрано з огляду на покриття ним 35% потужності, що забезпечило виробіток 96,3% теплової енергії за весь опалювальний період. Решта 65% потужності (або 3,6% теплової енергії покривалося за рахунок газового котла). Точка бівалентності припала на -10 °С, тобто лише коли температура взимку сягала нижче цієї позначки, включався догрів газовим котлом.

Тепер проаналізуємо вплив нерегулярних кліматичних умов, таких як, наприклад,

сонячне теплове випромінювання, що потрапляє в приміщення через застелення сонячної сторони і нагріває безпосередньо предмети всередині приміщень. Звісно при виборі теплонасосної станції фактор сонячної радіації вже опосередковано врахований через температуру довкілля, але сонячне тепло, що потрапляє у приміщення через застелення не можна включати в розрахунок, коли ми визначаємо необхідну максимальну теплову потужність, позаяк це нерегулярний і некорельований з температурою показник. Однак для аналізу споживання теплової енергії має сенс це врахувати. Для обрахунку кількості тепла від сонячного проміння ми використовуємо формулу:

$$S_{\text{сбк}} = S_{\text{мак}} \cdot \cos\theta \cdot K_{\text{ам}} \quad (7)$$

де  $S_{\text{мак}}$  – максимальна поверхнева густина сонячного випромінювання, Вт/м<sup>2</sup>;

$\theta$  - приведений кут падіння сонячних променів на поверхню застелення;

$K_{\text{ам}}$  - коефіцієнт, що враховує поправку на повітряну масу, яку необхідно пройти променю, причому:

$$K_{\text{ам}} = 1,1254 - \frac{0,1366}{\sin h} \quad (8)$$

де  $h$  – кут, який визначає висоту сонця над горизонтом і є функцією часу доби, дня року і географічної широти місцевості.

Накладаючи на цей розрахунок метеостатистичні дані про хмарність у конкретному регіоні можливо отримати кількість тепла від сонячного проміння, одержану за весь опалювальний період. У випадку мого дослідження розрахунки показали, що значне застелення фасаду школи забезпечило потрапляння тепла сонячного проміння впродовж опалювального періоду в розмірі більш як 6% від загальної потреби у теплі. Звісно це незначний ефект, коли мова йде про опалення газовим котлом, що не може забезпечити настільки гнучкого і чутливого регулювання, однак у випадку сучасних теплонасосних станцій можливості з регулювання значно вирости, і тому врахування цього фактора у розробці пропозиції для діючого об'єкту може проілюструвати реальну потенційну додаткову економію.

У цій статті я проаналізувала як і якою мірою різні фактори довкілля, а також деякі фактори, що ми своїми силами здатні змінити, можуть впливати на точність і, головне, результат рішення з впровадження теплонасосної установки на об'єкті. Розрахунки для моєї школи лягли в основу висновків наведених тут. Ця робота має практичне значення з точки зору застосування даного аналізу саме в умовах нашої держави. Гадаю, використані алгоритми аналізу та врахування факторів впливу можуть бути використані для розробки більш докладних і гнучких методик розрахунку, а також можуть у подальшому бути використані для створення спеціалізованих програмних продуктів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. СНІП П-3-79\* «Строительная теплотехника», изменение №4 от 1 марта 1998 г.
2. Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П. Радиационный расчет наклонных поверхностей. - Л.: Гидрометеоздат, 1978.
3. RETScreen®International. Ground-source Heat Pump Project Analysis: Chapter // RETScreen®Engineering & Cases Textbook. – Ministry of Natural Sources of Canada, 2005. – 70 p.
4. Kavanaugh P.K. and Rafferty K. Ground-source Heat Pumps — Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings // Publishing of American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, USA. — 1997. — 223 p.