

УДК 621.577.63

І.І.Пуховий, докт.техн.наук, А.М.Постоленко, Ю.Ю.Радчук (Національний технічний університет України "КПІ", Київ)

Аналіз схем теплопостачання з двома тепловими насосами та використанням вентиляційних викидів і повітря, підігрітого теплою кристалізації води

Розроблено і проаналізовано схеми теплопостачання громадських і житлових будівель для найхолоднішого періоду року. Розглянуто вплив кратності вентиляції, теплоізоляційних характеристик будівель і температур теплоносіїв на працездатність та ефективність схем з двома тепловими насосами, один із яких використовує теплоту кристалізації води.

Ключові слова: теплопостачання тепловими насосами, використання відпрацьованого вентиляційного повітря, теплота кристалізації води для підігрівання морозного повітря, схеми використання вентиляційного і атмосферного повітря, послідовне з'єднання конденсаторів теплових насосів, кратність вентиляції, теплоізоляція будівель, пасивні будівлі, тепла підлога.

Разработаны и проанализированы схемы теплоснабжения общественных и жилых зданий для наиболее холодного периода года. Рассмотрено влияние кратности вентиляции, теплоизоляционных свойств зданий и температур теплоносителей на работоспособность и эффективность схем с двумя тепловыми насосами, один из которых использует теплоту кристаллизации воды.

Ключевые слова: теплоснабжение тепловыми насосами, использование отработанного вентиляционного воздуха, теплота кристаллизации воды на подогрева морозного воздуха, схемы использования вентиляционного и атмосферного воздуха. Последовательное соединение конденсаторов тепловых насосов, кратность вентиляции, теплоизоляция сооружений, пассивные сооружения, теплый пол.

Теплонасосні технології теплопостачання допомагають економити енергію і відійти від використання природного газу. Розробки [1] показують велику роль використання теплоти кристалізації води для підігрівання повітря перед тепловими насосами і перед традиційними калориферами вентиляції.

Постановка задачі досліджень. Відомі дослідження теплонасосних схем теплопостачання, які направлені на врахування затрат додаткової енергії, що витрачається на переборення гідравлічних опорів при циркуляції теплоносія з низькою температурою через випарник теплового насоса (ТН) [2]. В [3] розглядаються теплонасосні станції, в яких конденсатори з'єднані послідовно, а випарники паралельно і працюють на одному й тому ж низькопотенційному теплоносії, що дозволяє підвищити загальний коефіцієнт трансформації.

Вентиляційне повітря є гарним джерелом низькопотенційної теплоти для ТН. Однак для забезпечення потреб у теплопостачанні будівлі його

може не вистачати. Відмінністю даного дослідження є використання у випарниках різних ТН окремих газових теплоносіїв – відпрацьованого вентиляційного і свіжого атмосферного повітря. Також свіже вентиляційне повітря підігрівається теплою кристалізації води. Розглядаються три схеми теплопостачання громадських і житлових будівель, що обладнані механічною системою вентиляції. Схеми відрізняються тим, що від ТН отримують теплоту вентиляція, гаряче водопостачання та опалення.

В розроблених схемах пропонується використовувати два теплових насоси, один із яких працює на викидному вентиляційному повітрі, а другий на атмосферному повітрі, яке в зимовий час при негативних температурах докілья попередньо підігрівається в кристалізаторі води до температур, близьких до 0°C. Лід, який утворюється в кристалізаторах, може бути використаний на холодопостачання влітку. Особливістю використання вентиляційного повітря є те, що його витрата залежить від кратності вентиляції, яка

для громадських приміщень може бути від 2 до 6, а для житлових – від 0,8 до 1,5. При невеликих кратностях вентиляції викидного повітря може не вистачати для роботи теплових насосів, що забезпечують повне тепlopостачання, і тоді виникає потреба підігрівати повітря теплотою кристалізації води, витрата якої при цьому мінімальна.

Передбачається дослідити вплив кратності вентиляції на можливість повного тепlopозабезпечення різних за термічним опором будівель, затрати потужності (енергії) на привід теплових насосів у різних схемах, а також вплив температури теплоносія, що виходить з ТН на атмосферному повітрі, на загальну потужність ТН при послідовному включенні конденсаторів теплових насосів.

Опис розроблених схем.

В першій схемі (рис. 1) працюють 2 теплові насоси, конденсатори яких включені паралельно, тобто робота першого ТН не залежить від роботи другого. Схема тепlopостачання будинку має 2 теплових насоси. Перший ТН працює незалежно від другого, повністю забезпечує потреби будівлі на ГВП і працює на атмосферному повітрі, яке при негативних температурах докiлля підігрівається в кристалізаторі 13 перед ТН. Коли кристалізатор не працює, повітря

з атмосфери прямо потрапляє до випарника 5. Низькопотенційна енергія атмосферного повітря і теплоти кристалізації води завдяки підведенню роботи в компресор 4 переходить у конденсатор 3, де підігрівається вода, яка поступає в сантехнічні прилади 11 приміщення 12 для забезпечення потреб у гарячому водопостачанні. Другий ТН забезпечує опалення та вентиляцію в приміщенні. В конденсатор ТН поступає зворотня вода із системи опалення та вентиляції, вона підігрівається і надходить у теплообмінник 9, де віддає частину теплоти вентиляційному повітрю і потрапляє в опалювальний прилад 10 для забезпечення комфортної температури в приміщенні. При цьому вентиляційний калорифер 9 і опалювальні прилади з'єднані послідовно, що дозволяє зменшити теплообмінну поверхню калорифера за використання низькотемпературної системи опалення. Останнє дозволяє не лише зменшити втрати ексергії, але й забезпечує більш комфортні умови, ніж традиційні системи опалення. При використанні "теплої підлоги" розподіл температури по висоті приміщення є більш комфортним для людини, тепліше повітря знаходиться внизу приміщення на рівні ніг, а холодніше знаходиться на рівні голови.

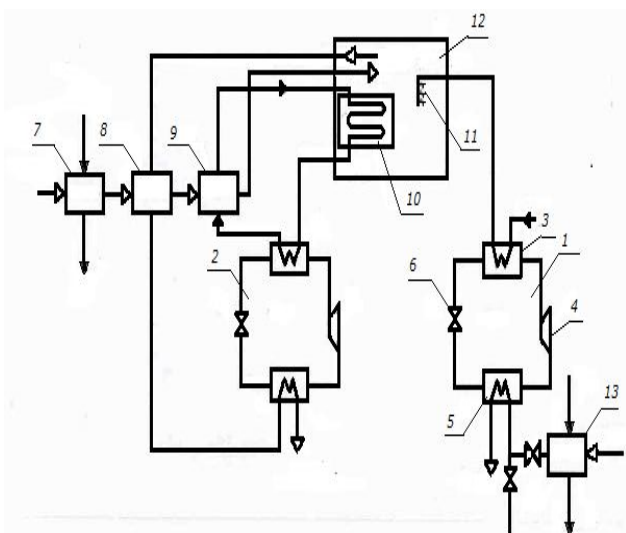


Рис. 1. Принципова схема комбінованої теплонасосної системи тепlopостачання, в якій конденсатори ТН працюють паралельно.

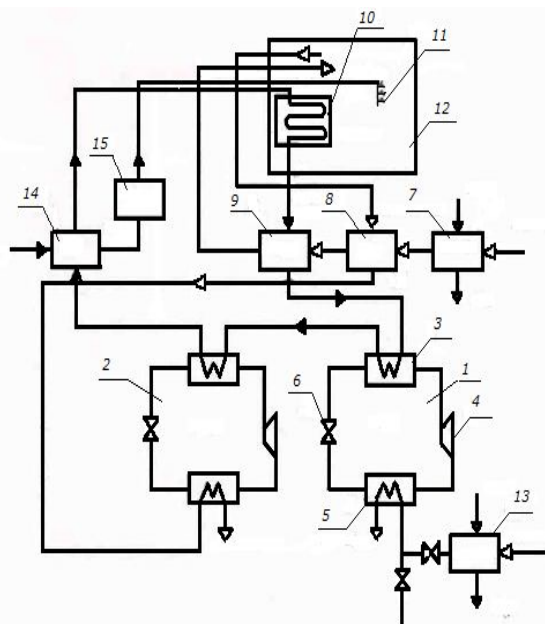


Рис. 2. Принципова схема теплонасосної системи, в якій конденсатори ТН працюють послідовно.

В схемах на рис. 1, 2 позначено: 1 – ТН на атмосферному повітрі; 2 – ТН на вентиляційному повітрі; 3 – конденсатор ТН; 4 – компресор ТН; 5 – випарник ТН; 6 – дросель ТН; 7 та 13 – кристалізатори води; 8 – регенератор; 9 – калорифер; 10 – опалювальний прилад; 11 – сантехнічні прилади; 12 – приміщення; 14 – теплообмінник системи ГВП; 15 – акумулятор гарячої води.

Послідовне з'єднання калорифера з опалювальними приладами також дозволяє зменшити температуру на вході в конденсатор другого ТН, що сприяє зменшенню температури відводу теплоти з ТН і збільшенню коефіцієнта трансформації. Повітря, призначене для потреб вентиляції, з атмосфери поступає в кристалізатор 7 і нагрівається там, після чого воно надходить у регенератор 8, в якому підігрівається відпрацьованим вентиляційним повітрям. Остаточне вентиляційне повітря догрівається в ТО 9 гарячою водою з конденсатора і надходить у приміщення. Викидне вентиляційне повітря поступає в регенератор 8, де віддає свою теплоту свіжому повітрю, після чого надходить у випарник ТН, де охолоджується і викидається в атмосферу.

Лід із кристалізаторів 7 і 13 використовують на холодопостачання влітку. Відомо, що для холодопостачання громадських будівель необхідно більше енергії, ніж для теплопостачання [4].

У другій схемі (рис. 2) використовується два ТН, конденсатори яких з'єднані послідовно, що дозволяє підігріти воду до більш високої температури і зекономити електроенергію на привід компресорів. Системи ГВП, опалення та вентиляції підключені послідовно. Зворотня вода із системи опалення поступає в калорифер системи вентиляції, за рахунок чого зменшується температура на вхід конденсатора першого ТН та підвищується ефективність системи в цілому. Робота схеми мало чим відрізняється від попередньої.

В цій схемі опалення здійснюється теплою підлогою. Вода системи опалення нагріває повітря в калорифері 9 і поступає на вхід конденсатора першого ТН. При цьому калорифер 9 і опалювальні прилади з'єднані послідовно, що дозволяє

зменшити теплообмінну поверхню калорифера за використання низькотемпературної системи опалення. Також це дозволяє зменшити температуру на вході в конденсатор ТН на вентиляційному повітрі.

Недоліком даної схеми є те, що всі системи опалення, вентиляції та ГВП підключені послідовно, тому повинні працювати постійно. Але вночі немає водорозбору, тому в даній схемі доцільно використати акумулятор гарячої води 15.

Третя схема теплопостачання (рис. 3) має конденсатори теплових насосів, що підключені послідовно, а система ГВП підключена паралельно до системи опалення і вентиляції в конденсатор другого ТН, що дозволяє догрівати воду до більш високої температури. Зворотня вода системи опалення і вода, яка віддала частину теплоти в теплообміннику 14, з'єднуються в один потік, який надходить у калорифер, де нагріває повітря для вентиляційних потреб і після цього поступає на вхід конденсатора першого ТН.

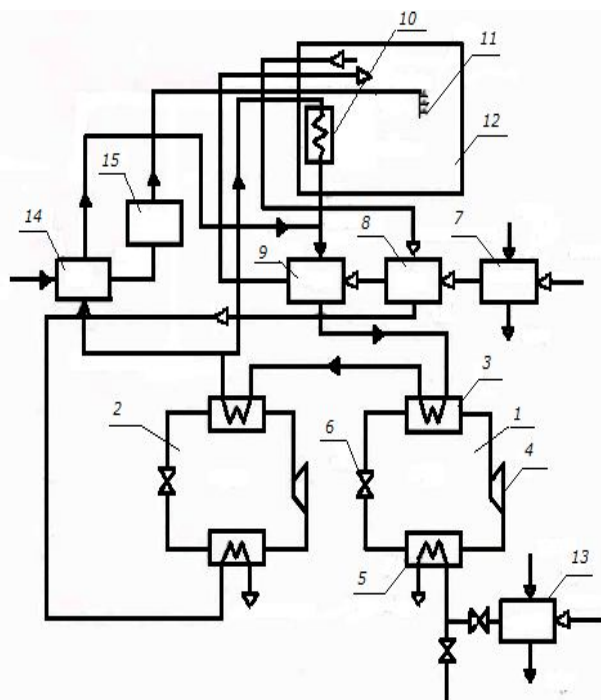


Рис. 3. Схема комбінованої теплонасосної системи теплопостачання, в якій конденсатори ТН працюють послідовно, а система опалення і вентиляції приєднана паралельно до системи ГВП. Позначення див. на рис. 1, 2.

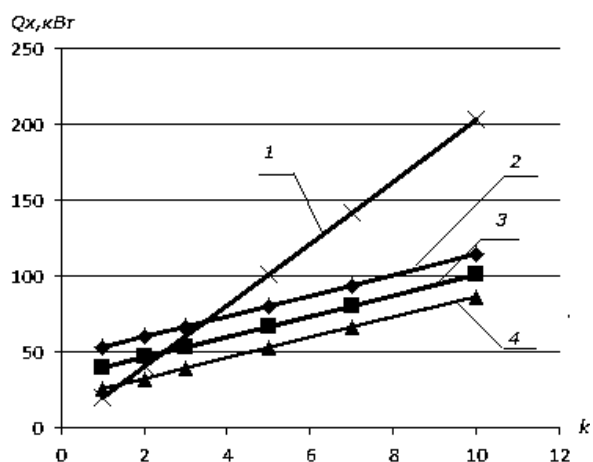


Рис. 4. Залежність теплової потужності "холодного" джерела другого ТН від кратності вентиляції (схема 1): 1 – можлива теплова потужність "холодного" джерела від вентиляції; 2, 3, 4 – потужність, яку необхідно виробляти у випарнику відповідно для старих, нових та пасивних громадських будівель.

Таким чином, зменшується температура води на вході в конденсатор першого ТН і підвищується його ефективність. У даній схемі можна використовувати традиційні опалювальні прилади на відміну від попередніх схем, які працюватимуть лише за використання низькотемпературної системи опалення. Це вигідно, якщо дана схема буде використовуватись у старих будівлях, де недоцільно встановлювати низькотемпературну систему опалення. Атмосферне повітря підігрівается в кристалізаторі 7 і надходить у регенератор 8. Далі воно догрівається в калорифері 9 і поступає у приміщення для вентиляції. Відпрацьоване вентиляційне повітря поступає в регенератор, охолоджується і йде до випарника другого ТН.

Проведено розрахунки кожної зі схем для громадської та житлової будівлі для умов січня, як місяця з найвищими потребами в теплоті. Громадська будівля знаходиться в м. Києві, її площа складає $S=1000 \text{ м}^2$, висота $H=3 \text{ м}$ та об'єм $V=3000 \text{ м}^3$, кратність вентиляції $k=1; 2; 3; 5; 7; 10 \text{ 1/год}$; витрата гарячої води на одну людину 5 кг.

Розрахунок першої схеми (рис. 1) теплопостачання на базі ТН, конденсатори яких працюють паралельно. Коефіцієнт трансформації φ ТН знаходився за методикою [3] при коефіцієнті

необоротностей 0,55 на атмосферному повітрі при різних температурах гарячої води, приймаючи, що повітря у кристалізаторі підігрівается до 0°C і охолоджується до мінус 20°C у випарнику ТН при температурі після конденсатора $T_r=45^\circ\text{C}$ $\varphi=2,7$, а при 50°C $\varphi=2,4$. Використовуючи кристалізатор перед тепловим насосом, можна збільшити коефіцієнт трансформації на 13-20%.

Другий ТН (рис. 1) забезпечує потреби будівлі на опалення та вентиляцію. Проведено розрахунки для різних видів будівель з точки зору термічного опору їх огорож для умов січня. Коефіцієнт трансформації другого ТН становить 3, за $T_r=55^\circ\text{C}$ і охолодження вентиляційного повітря у випарнику ТН від 10 до мінус 10°C . Аналізуючи криві на рис. 4, можна зробити висновок, що дана схема є працюючою для пасивних будинків при кратності вентиляції біля $k=1$, для нових будинків – при $k=2$ та для старих будинків при $k=3,5$. Теплові потужності "холодного" джерела представлені на рис. 4.

В другій схемі (рис. 2) системи опалення, вентиляції та ГВП увімкнені послідовно. Розрахунки показали, що в діапазоні температур після конденсатора вентиляційного ТН $55-65^\circ\text{C}$ коефіцієнти трансформації відповідно зменшуються від 2,9 до 2,55.

Рис. 4 демонструє вплив кратності вентиляції на забезпеченість холодним джерелом енергії у вигляді вентиляційного повітря для громадських будівель і схеми 1. Видно, що для добре ізольованих пасивних будівель вентиляційного повітря достатньо для забезпечення всіх потреб теплопостачання навіть при кратності вентиляції, меншій за 1.

Результати розрахунків при температурі води на вході в конденсатор першого ТН 25°C для старих громадських будівель, при витраті гарячої води $m_n=5 \text{ л/добу}$ та залежно від кратності вентиляції представлено у вигляді графічних залежностей на рис. 5. Зі збільшенням температури на виході з конденсатора ТН зменшується коефіцієнт трансформації, тому необхідно підводити більше потужності на привід компресора, проте зі зміною температури потужність зростає більш помітно при великих значеннях кратності вентиляції.

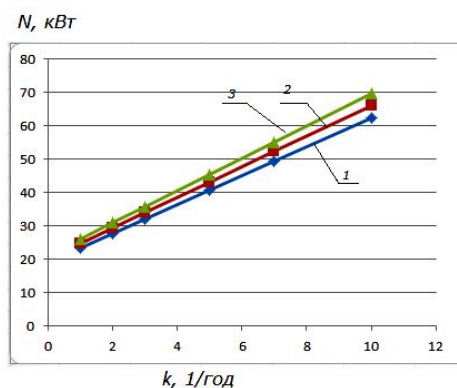


Рис. 5. Сумарна електрична потужність на привід двох компресорів ТН залежно від кратності вентиляції при різних температурах води на виході з конденсатора другого (вентиляційного) ТН:

1 – $T_2=55^{\circ}\text{C}$; 2 – $T_2=60^{\circ}\text{C}$; 3 – $T_2=65^{\circ}\text{C}$.

Також важливо знати, яким чином буде залежати сумарна електрична потужність на привід компресорів двох теплових насосів, якщо температури на вході в конденсатор першого ТН та на виході з конденсатора другого ТН будуть незмінними, а змінюватиметься температура на виході з конденсатора першого атмосферного ТН. Результати розрахунків при незмінних температурах на вході в конденсатор першого ТН і на виході з другого ТН відповідно $T_{\text{вх1}}=25^{\circ}\text{C}$ та $T_{\text{г2}}=60^{\circ}\text{C}$ наведені на графіку (рис. 6).

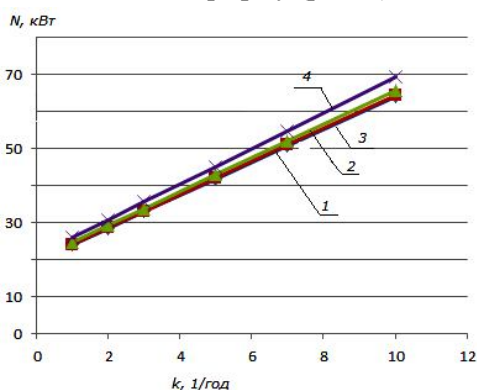


Рис. 6. Залежність сумарної електричної потужності від температури на виході з конденсатора вентиляційного ТН та кратності вентиляції:

1 – $T_{\text{г1}}=35^{\circ}\text{C}$; 2 – $T_{\text{г1}}=40^{\circ}\text{C}$; 3 – $T_{\text{г1}}=45^{\circ}\text{C}$; 4 – $T_{\text{г1}}=50^{\circ}\text{C}$.

На рис. 6 видно, що сумарна електрична потужність залежить від температури на виході з конденсатора першого ТН і має тенденцію до збільшення зі зростанням температури в конденсаторі вентиляційного ТН. Якщо кратність невелика і вентиляційного повітря не вистачає для забезпечення необхідної теплової потужності, то можна збільшити витрату атмосферного повітря. І навпаки, при великих кратностях вентиляції

можна зменшити навантаження на перший атмосферний ТН.

Це є перевагою даної схеми 2 в порівнянні з першою, оскільки там ТН працюють паралельно і не залежать один від одного.

Дослідимо схему 2 на працездатність для житлових будівель, де витрата теплоти на ГВП більша, ніж для громадських будівель і становить $m_{\text{л}}=50$ л/добу за середніми європейськими нормами (рис. 7). Приймаємо, що температура на виході з конденсатора другого ТН становить $T_{\text{г}}=55^{\circ}\text{C}$, а вентиляційне повітря у випарнику охолоджується від 10 до мінус 10°C , температура гарячої води $T_{\text{г.в}}=45^{\circ}\text{C}$, тобто, за європейськими нормами для житлових будівель.

На рис. 7 видно, що дана схема є працездатною в січні без використання теплоти кристалізації для пасивних будинків при кратності вентиляції біля $k=2$, для нових будинків при $k=3$ та для старих будинків при $k > 4$ (в житлових будинках нормою є $k \approx 1$). При менших кратностях вентиляції у випарник другого ТН буде поступати менше повітря, тому теплоти, яка відбиратиметься від нього, буде недостатньо для нагрівання води в конденсаторі. При більших k немає необхідності охолоджувати повітря від 10 до мінус 10°C ; можна збільшувати температуру на виході з випарника шляхом підвищення витрати повітря, а це значить, що коефіцієнт трансформації другого ТН зі збільшенням кратності вентиляції буде збільшуватись.

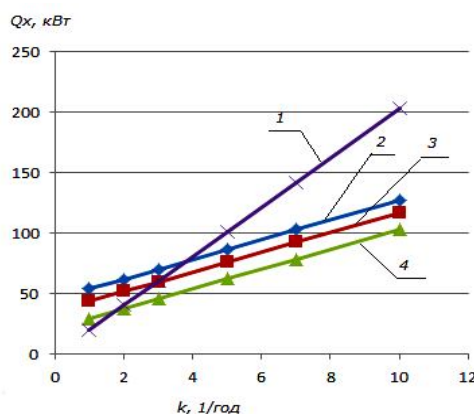


Рис. 7. Залежність теплової потужності "холодного" джерела другого ТН від кратності вентиляції:

1 – можлива теплова потужність "холодного" джерела від вентиляційного викидного повітря; 2, 3, 4 – теплова потужність, яку необхідно виробляти у випарнику для старих, нових та пасивних житлових будинків.

Доцільно проаналізувати, як змінюватиметься електрична потужність на привід компресорів теплових насосів залежно від температури на виході з конденсатора першого ТН. Проведемо розрахунки для **третьої схеми** при температурі води на вході в перший атмосферний ТН $T=40^{\circ}\text{C}$ та виході з вентиляційного ТН $T_{r2}=80^{\circ}\text{C}$ для температур атмосферного ТН $T_{r1}=50; 55; 60; 65$ та 70°C . В табл. 1 наведено розрахунки при кратності вентиляції $k = 1$ /год. Розрахунки при різних кратностях вентиляції показують таку ж тенденцію, як і на рис. 7. На рисунку видно, що температура на виході з конденсатора ТН, що працює на атмосферному повітрі, мало впливає на сумарну електричну потужність на привід компресорів теплових насосів, проте зі збільшенням температури має тенденцію до збільшення.

Таблиця 1. Результати розрахунків потужності на привід компресорів при кратності вентиляції $k=1$ /год і підігріванні повітря перед першим ТН

| $T_{r2}, ^{\circ}\text{C}$ | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|
| Φ_2 | 2,53 | 2,4 | 2,3 | 2,18 | 2,1 |
| $Q_{r2}, \text{кВт}$ | 16,4 | 24,6 | 32,8 | 41,1 | 49,3 |
| $N_2, \text{кВт}$ | 6,5 | 10,3 | 14,3 | 18,8 | 23,5 |
| Φ_1 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 |
| $Q_{r1}, \text{кВт}$ | 49,3 | 41,1 | 32,8 | 24,6 | 16,4 |
| $N_1, \text{кВт}$ | 22,4 | 18,7 | 14,9 | 11,2 | 7,5 |
| $\Sigma N, \text{кВт}$ | 28,9 | 28,9 | 29,3 | 30 | 30,9 |

З розрахунків, наведених у табл. 1 видно, що коефіцієнти трансформації теплових насосів менші в порівнянні з першою та другою схемою. Це пов'язано з тим, що температура на виході з конденсатора теплового насоса на вентиляційному повітрі є вищою. Тому дана схема доцільна для будівель, де є необхідність використання традиційних опалювальних приладів із високою температурою теплоносія.

Висновки. 1. Для працездатності та ефективності всіх розроблених схем з використанням

відпрацьованого атмосферного повітря поряд із використанням регенератора слід обов'язково підігрівати теплою кристалізацією води свіже вентиляційне повітря з атмосфери перед регенератором.

2. Паралельне незалежне підключення теплових насосів може забезпечити гаряче водопостачання влітку без роботи другого ТН на вентиляційному повітрі; також дана схема не потребує використання акумулятора гарячої води.

3. При кратностях вентиляції менших за 3-4 (житлові будинки) вентиляційне повітря, що може бути охолоджене в теплому насосі, не забезпечує потреб теплопостачання і вимагає додаткового використання ТН на атмосферному повітрі з використанням теплоти кристалізації води для підігрівання атмосферного повітря в період негативних температур.

4. Зі збільшенням термічного опору будівель потреба в додатковому використанні теплоти кристалізації зменшується.

5. Послідовне включення опалення і вентиляції при послідовному включенні конденсаторів ТН зменшує температуру теплоносія перед конденсатором ТН, що працює на атмосферному повітрі, і підвищує його коефіцієнт трансформації.

1. Пуховий І.І., Безродний М.К., Мхітарян Н.М., Кудря С.О. Економія природного газу при заміні котлів тепловими насосами та використання теплоти кристалізації води як альтернативи теплоті ґрунту // Відновлювана енергетика. – 2006. – № 1. – С. 15–19.

2. Безродний М.К., Припула Н.О. Термодинамічна ефективність теплонасосних схем теплопостачання // Вісник ВПІ. – 2013. – С. 39–45.

3. Безродний М.К., Пуховий І.І., Кутра Д.С. Теплові насоси та їх використання. – Київ: НТУУ "КПІ", 2013. – 312 с.

4. Пуховий І.І., Кривошеєв М.О. Аналіз теплопритоків і теплотер, кондиціонування повітря з використанням льдохранилищ в пасивних зданиях // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2011. – № 6. – С. 28–32.