

2. Режим доступу: <<http://dokaholod.com/freon-r290/>>.
3. Хмельнюк М.Г. Повышение эффективности установки низкотемпературной конденсации природного газа / М.Г. Хмельнюк, М.О.Мартинюк.

УДК 621.577+697.442

Кравцов В.В., д-р техн. наук, проф., Грідін С.В., канд. техн. наук, доц.,
Сафьянц А. (ДонНТУ, Донецьк),
Карнаух В.В., канд. техн. наук, доц. (ДонНУЕТ, Донецьк)

ПРО ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ ДЛЯ ПОКРИТТЯ НАВАНТАЖЕНЬ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ОПАЛЕННЯ

У статті розглянуто доцільність застосування теплового насоса (ТН), що працює на стічних водах, у схемі теплоелектропостачання житлового масиву. Виконано розрахунок і підбір ТН, що працює у комплексі когераційна установка – тепловий насос.

Ключові слова: тепловий насос, теплоносії, когераційна установка, бак-акумулятор, теплопродуктивність.

Найбільшого застосування теплонасосні установки (ТНУ) набувають для теплопостачання, гарячого водопостачання житлових, адміністративних і виробничих будівель, забезпечення тепловою енергією потрібного потенціалу ряду технологічних процесів (сушіння, дистиляція, теплове оброблення); тепло- та холодопостачання сільськогосподарських об'єктів (молочно-товарних ферм, фруктовосховищ, зерносклади та ін.). Сьогодні у світі експлуатується більше 10 млн теплових насосів різної потужності: від десятків кіловат до мегават.

Теплопостачання середніх міст і селищ здійснюється в основному від великих ТЕЦ і котелень, які розміщено в межах населеного пункту, шкідливі викиди яких завдають великої екологічної шкоди містам. Застосування теплових насосів кардинально покращує умови теплопостачання: у 2 рази може бути скорочено споживання первинної енергії (органічного палива); система теплопостачання стає децентралізованою, не вимагає нових протяжних теплових мереж; виробництво електроенергії та пов'язаний із цим викид продуктів згорання органічного палива можуть бути винесені за межі населених пунктів [2; 3].

З урахуванням вказаних технологічних та екологічних недоліків традиційної теплофікації, теплонасосні установки призначено для переходу до децентралізованих систем теплопостачання, коли тепла енергія генерується поблизу її споживача, а паливо спалюється поза населеного пункту (міста). Упровадження таких економічних та екологічно чистих технологій теплопостачання необхідно, у першу чергу, для новобудівель та населених пунктів із повним виключенням застосування електрокотелень, споживання енергії яких у 3-4 рази перевищує споживання її ТНУ.

Перевага теплових насосів полягає також у тому, що вони можуть бути вбудовані до системи теплопостачання, що існує.

Метою статті було дослідження доцільності та можливості регулювання навантажень в системі теплоелектропостачання за допомогою теплових насосів, що працюють на стічних водах; визначення економічної ефективності щодо впровадження проекту із заміщення котельної, що існує.

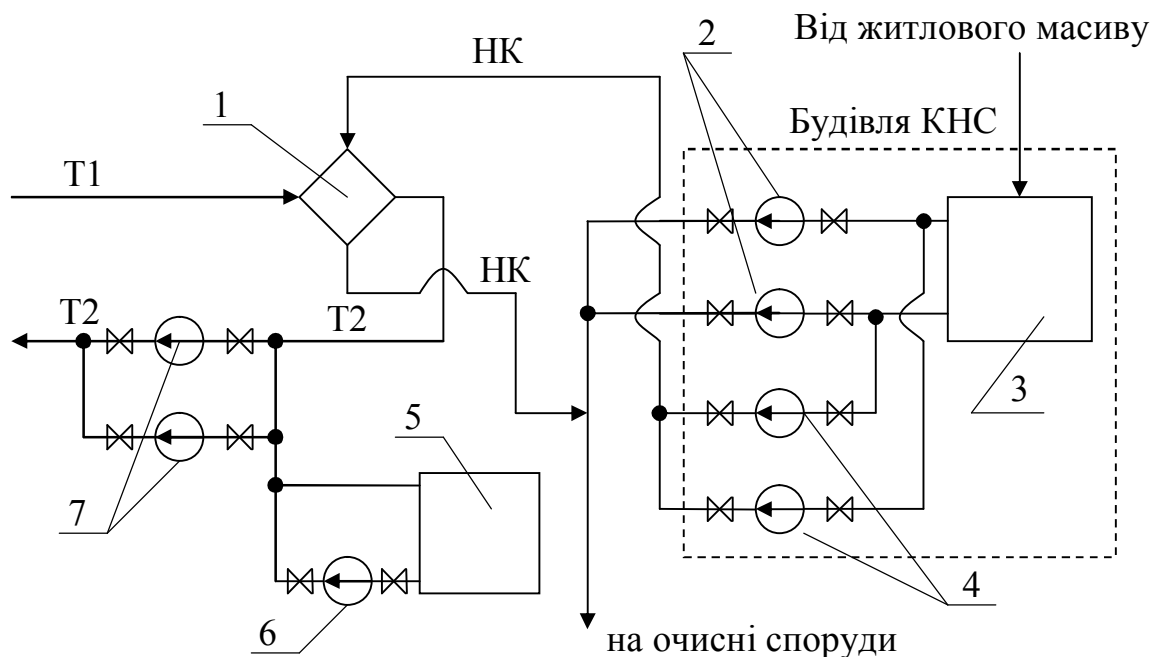
Котельня, що існує, є опалювальною, вона обладнана трьома водонагрівальними газовими котлами типу КВГ-6,5. Споживач – житловий масив, що містить 12 житлових будинків із загальною чисельністю мешканців 4401 чоловік. Середнє навантаження гарячого водопостачання становить 1,44 МВт (1,24 Гкал/год), максимальне опалювальне навантаження дорівнює 4,8 МВт (4,127 Гкал/год). Завантаження котла КВГ-6,5 у літній період становить всього 18,5%. У результаті такої роботи мали місце перевитрати природного газу та електроенергії на вироблення та транспортування гріючого теплоносія, що нагріває.

У проекті як джерело низькопотенційної теплоти для ТНУ передбачається використовувати неочищені каналізаційні стоки. Станція перекачування каналізаційних стоків перебуває на відстані 70 метрів від котельної, що діє. Відповідно до принципової схеми теплонасосної установки, утилізація низькопотенційної теплоти відбувається в підземному теплообміннику типу «труба у трубі». Проміжним теплоносієм є 10%-вий розчин етиленгліколю. Він у тепловому насосі за допомогою холодильного агента нагріває теплоносій, що гріє до 50°C, який далі догрівається до 60°C у когераційній установці.

Забір каналізаційних стоків із температурою 10-20°C здійснюється з приймального резервуара насосної станції. Після підземного теплообмінника охолоджені на 5-10°C стоки скидаються до напірного колектора, що існує (тиск охолоджених стоків перевищує тиск у напірному колекторі). Проектом передбачено регулювання продуктивності теплових насосів залежно від температури стоків, що охолоджуються, щоб уникнути зниження температури стоків на рівень нижче плюс 5°C.

Як згадувалося вище, схематично тепловий насос можна уявити у вигляді системи з трьох замкнутих контурів. У першому, зовнішньому, циркулює тепловіддавач (теплоносій, що збирає теплоту навколишнього середовища), у другому контурі – холодогент (речовина, яка випаровується, відбираючи теплоту від тепловіддавача, конденсується і віддає теплоту теплоприймачу), у третьому контурі – теплоприймач (вода із систем опалення та гарячого водопостачання будівлі). Теплоносій (у нашому випадку стічні води) у теплообміннику-утилізаторі (ТУ) типу «труба у трубі» віддає теплоту 10%-му розчину етиленгліколю і охолоджується з 20°C до 15,4°C, останній нагрівається за 8°C до 13°C. У випарнику ТНУ теплота етиленгліколю витрачається на випаровування холодильного агента (наприклад, холодоагент R-134a (1,1,1,2-тетрафторетан CH₂F-CF₃)). ТНУ працює за зворотнім циклом Карно, тому за рахунок теплоти конденсації R-134a нагрівається технологічна вода. Принципову схему зовнішнього контуру теплонасосної установки подано на рисунку 1.

Комунальні підприємства, такі як котельня, отримують досить дорогу електроенергію, тому власне виробництво цього енергоресурсу на когераційній установці (КГУ) буде перспективним. Однак, слід урахувати необхідність уникання видавання електроенергії до енергосистеми у нічні години.



1 – теплообмінник-утилізатор; 2 – насос подавання стічних вод на очисні споруди; 3 – приймальна ємність стічних вод; 4 – циркуляційні насоси стічних вод; 5 – бак з етиленгліколем; 6 – насос підживлення етиленгліколю; 7 – насоси проміжного теплоносія – етиленгліколю; T1 – трубопровід етиленгліколю на вході до ТУ; T2 – трубопровід етиленгліколю на виході з ТУ; НК – напірна побутова каналізація.

Рисунок 1 – Принципова схема зовнішнього контуру ТНУ

Схему, в якій вся електроенергія КГУ споживається у ТНУ, а теплота, утилізована в КДУ, йде на нагрівання теплоносія після ТНУ, позначимо як комплекс КГУ-ТНУ.

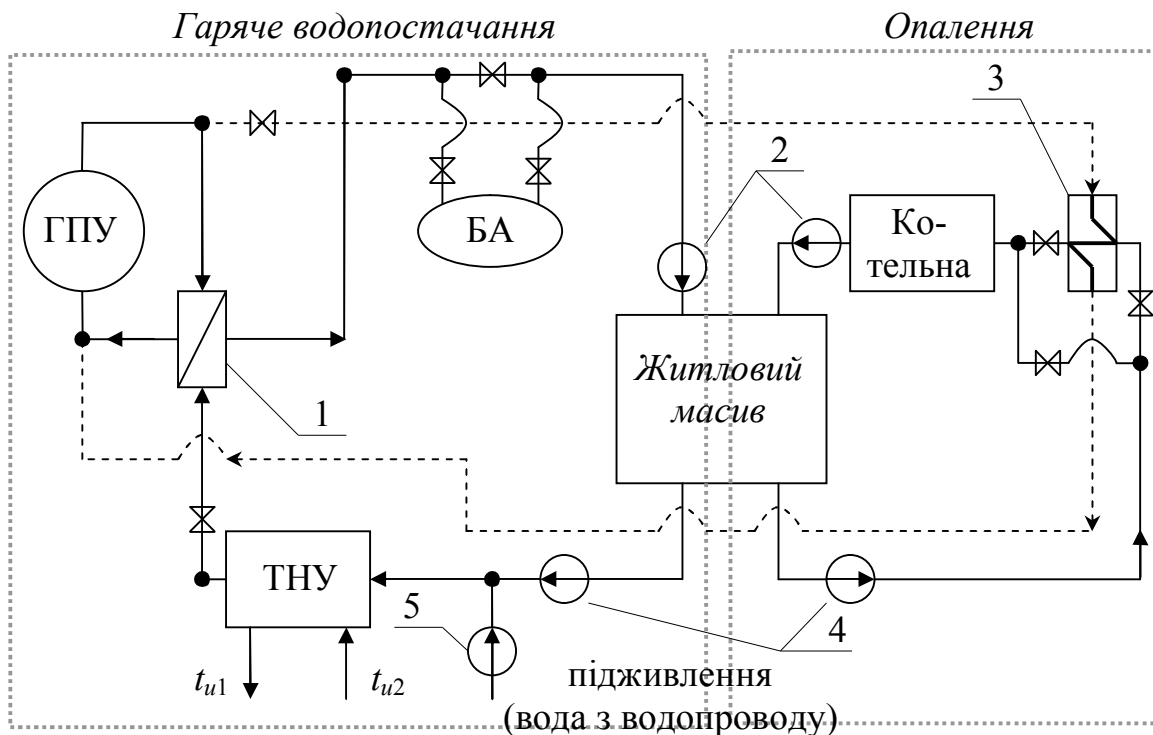
На рисунку 2 наведено принципову схему КГУ-ТНУ з баком-акумулятором без видавання електроенергії до мережі.

Вода після споживача підживлюється через насос 5 водопровідною водою температурою 5°C взимку і 15°C влітку. Теплонасосна установка є першим ступенем нагрівання мережевої води. Проходячи через ТНУ, вона підвищує свою температуру до $t_{ТНУ}$. Далі за допомогою теплообмінника 1 підігрівається водою від ГПУ до 60°C. Після цього підготовлена вода або накопичується у БА, а її залишок спрямовується насосом 2 до споживача, або підживлюється водою від БА і так само йде до споживача. Після споживача вона насосом 4 знову подається на нагрівання.

За базове навантаження приймаємо середньодобове навантаження у зимовий вихідний день, тобто $Q_{баз} = Q_{ГВС,cr}^{вих.з} = 1,897 \text{ МВт} = 1,631 \text{ Гкал/год.}$

Тоді визначимо кількість теплоти, яка накопичується або витрачається баком-акумулятором за одну годину у вихідний день опалювального періоду:

$$Q_{зар/разр} = Q_{баз} - Q_{ГВС} = 1,897 - 0,872 = 1,026 \text{ МВт.}$$



БА – бак-акумулятор; ГПУ – газопоршньова установка; ТНУ – теплонасосна установка.

1 – теплообмінник для підігріву води на подавання для ГВП; 2 – насоси подавання; 3 – теплообмінник для підігріву води, що надходить до котельні, 4 – циркуляційні насоси; 5 – насос підживлення.

Рисунок 2 – Принципова схема КГУ-ТНУ з баком-акумулятором без видавання електроенергії до мережі

Бак-акумулятор з 24⁰⁰ до 10⁰⁰ заряджається, а в інші години – розряджається. Тоді теплова ємність БА буде розраховуватися таким чином:

$$Q_{БА} = \sum_{24^{00}-10^{00}} Q_{КГУ(надстр)} = 8,225 \text{ МВт}.$$

Визначимо об'єм БА за формулою:

$$V_{БА} = \frac{Q_{БА} \cdot 1000}{\rho \cdot c \cdot \Delta t} = \frac{8,225 \cdot 1000}{1000 \cdot 4,19 \cdot (60 - 5)} = 135,2 \text{ м}^3.$$

Частку навантаження, яку буде нести ТНУ, обчислимо за формулою [1]:

$$\alpha' = \frac{\mu_{ТНУ}^{ТЕЦ} \cdot \eta_{ЕЛ.НЕТ}^{ТЕЦ}}{\eta_T^{КГУ} + \mu_{ТНУ}^{ТЕЦ} \cdot \eta_{ЕЛ.НЕТ}^{ТЕЦ}} = \frac{3 \cdot 0,35}{0,5 + 3 \cdot 0,35} = 0,677.$$

Тоді частка навантаження, що припадає на когераційну установку, буде визначатися за формулою:

$$\beta' = 1 - \alpha' = 1 - 0,677 = 0,323.$$

Розрахуємо теплопродуктивність теплонасосної установки:

$$Q'_{THY} = \alpha' \cdot Q_{\text{баз}} = 0,677 \cdot 1,897 = 1,285 \text{ МВт.}$$

Тоді електричне навантаження приводу ТНУ буде розраховане наступним чином:

$$N'_{THY} = Q'_{THY} / \mu_{THY}^{ТЕЦ} = 1,285 / 3 = 0,428 \text{ МВт.}$$

Прийmemo кількість теплових насосів у ТНУ $n_{TH} = 3$ шт. Для збільшення коефіцієнта перетворення теплових насосів COP приймаємо паралельну схему включення теплових насосів по воді, що охолоджується, і послідовну – по воді, що нагрівається.

Рециркуляційні насоси потрібні для підтримки необхідного перепаду температур, оскільки підвищення температури в тепловому насосі не може перевищувати 4-8°C.

Визначимо необхідну теплопродуктивність одного теплового насоса у ТНУ:

$$Q_{TH} = \frac{Q'_{THY}}{n_{TH}} = \frac{1,285}{3} = 0,428 \text{ МВт.}$$

Виконаємо розрахунок ТНУ й уточнюємо значення $COP_{THY}^{ТЕЦ}$.

Температура кипіння холодильного агента у випарнику ТН:

$$t_o = t_{\text{ет.глик.}} - 10 = 12 - 10 = +2^\circ\text{C.}$$

На вході до першого теплового насоса температура мережної води за допомогою контуру рециркуляції піднімається від 5°C до 25°C.

Тому значення температури конденсації розраховується:

$$t_k = t_{\text{вод}} + 10 = 25 + 10 = 35^\circ\text{C.}$$

На рисунку 3 показано цикл роботи одноступінчатого теплового насоса на стічних водах у $\log p-h$ – діаграмі для холодогента R-134a.

На рисунку 3 лінія 4-1'' відповідає процесу кипіння R134a у випарнику ТН за температури кипіння плюс 2°C за рахунок теплоти, що відводиться від 10%-го розчину етиленгліколю (останній охолоджується приблизно на 5°C) (т. 4 – хладон у стані вологої насиченої пари; т. 1'' – суха насичена пара; лінія 1''-1 – регенеративний підігрів насичених парів хладону теплотою гарячого рідкого хладону ($Q_{\text{рег}}$) до стану перегрітої пари; лінія 1-2 – відповідає адіабатичній (у реальному циклі політропній) роботі стиснення хладону у компресорі).

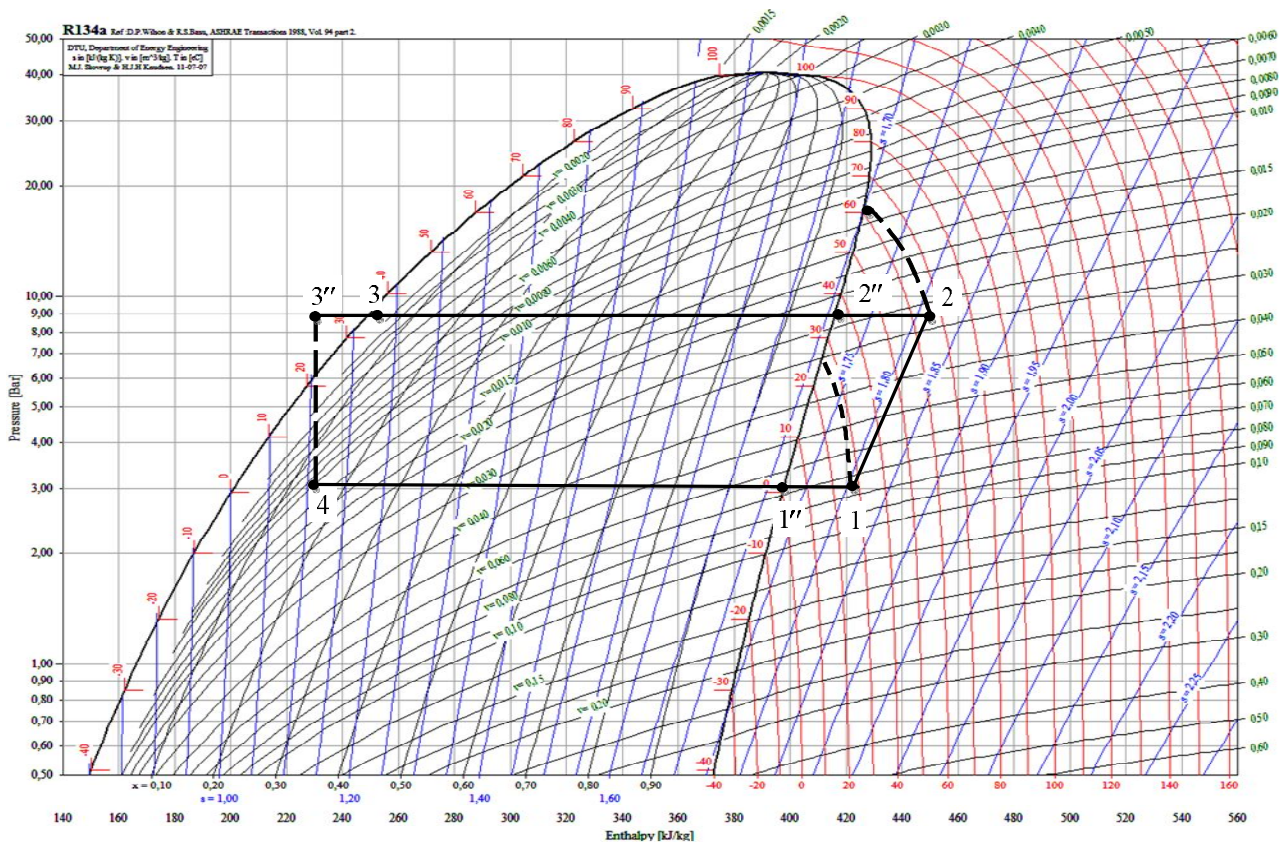


Рисунок 3 – Цикл роботи одноступінчатого теплового насоса на стічних водах у $\log p-h$ – діаграмі для R-134a

Процес 2-2''-3 – відведення теплоти високому потенціалу – технологічній (мережевій) воді (конденсація х.а за температури конденсації плюс 35°C). Процес 3''- 4 – дроселювання хладону до тиску, що відповідає температурі кипіння.

Використовуючи чисельні значення параметрів у вузлових точках циклу, проводимо тепловий розрахунок.

Питома кількість теплоти, що підводиться до холодильного агенту:

$$q_0 = h_{1''} - h_4 = 390 - 230 = 160 \text{ кДж/кг.}$$

Питома об'ємна холодопродуктивність:

$$q_v = q_0 / v_1 = 160 / 0,073 = 2191,8 \text{ кДж/м}^3.$$

Адіабатна робота стиснення компресора:

$$l_a = h_2 - h_1 = 445 - 420 = 25 \text{ кДж/кг.}$$

Кількість холодильного агенту, що циркулює:

$$G_a = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{Q_{TH}}{q_0} = \frac{428}{160} = 2,67 \text{ кг/с.}$$

Об'єм пари, який відсмоктується компресором в одиницю часу:

$$V_{\partial} = G_a \cdot v_1 = 2,67 \cdot 0,073 = 0,19 \text{ м}^3/\text{с}.$$

За каталогом підбираємо теплові насоси серії McQuay, характеристики яких подано у таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристика теплових насосів ТНУ серії McQuay [4]

ТН	Серія та тип	$\mu_{тн}$	$Q_{ТН}$, кВт	$N_{ТН}$, кВт
1	WHS-ST 118.1	5,45	425	78
2	ECOPLUS SE-ST 133.2	3,22	426	132
3	ECOPLUS SE-ST 133.2	3,01	434	144
Разом			1285	354

Сумарна теплова потужність теплових насосів дорівнює $Q_{\Sigma}^{THY} = 1,285 \text{ МВт}$, а сумарна електрична потужність приводу ТН – $N_{\Sigma}^{THY} = 0,354 \text{ МВт}$. Тоді коефіцієнт перетворення групи теплових насосів буде визначатися таким чином:

$$COP_{THY}^{ТЕЦ} = \frac{Q_{\Sigma}^{THY}}{N_{\Sigma}^{THY}} = \frac{1,285}{0,354} = 3,6.$$

Перерахуємо частки навантаження, які буде нести тепловий насос і КГУ, ураховуючи отриманий коефіцієнт перетворення ТНУ:

$$\alpha' = \frac{3,6 \cdot 0,35}{0,5 + 3,6 \cdot 0,35} = 0,716;$$

$$\beta' = 1 - 0,716 = 0,284.$$

Теплопродуктивність та електричне навантаження приводу теплонасосної установки:

$$Q_{THY} = 0,716 \cdot 1,897 = 1,358 \text{ МВт};$$

$$N_{THY} = 1,358 / 3,6 = 0,377 \text{ МВт}.$$

Визначимо температуру мережної води після ТНУ:

$$t_{THY} = t_1'' = 25 + 0,716 \cdot (60 - 25) = 50,1^{\circ} \text{C}.$$

Запропонована схема працює тільки у базовому режимі, тому виробництво теплової енергії КГУ обчислимо наступним чином:

$$Q_{KГУ} = \beta \cdot Q_{баз} = 0,284 \cdot 1,897 = 0,539 \text{ МВт.}$$

Надлишкове електричне навантаження КГУ відповідно буде нульовим. Тому електричне навантаження когенераційної установки буде дорівнювати електричному навантаженню приводу ТНУ, тобто:

$$N_{KГУ} = N_{ТНУ} = 0,377 \text{ МВт.}$$

Обираємо одну ГПУ від виробника VITOBLOC типу 200 EM-401/549 з електричною потужністю 401 кВт.

Річна економія коштів за впровадженням схеми КГУ-ТНУ та БА без видавання електроенергії до мережі становила $E_{річ} = 2,340$ млн грн. Тоді період окупності проекту буде дорівнювати:

$$ПО = \frac{K_{\Sigma}}{E_{річ}} = \frac{8,204}{2,340} = 3,5.$$

У будні опалювального періоду також можна використовувати теплову потужність установки для часткового покриття навантаження на опалення, що передбачено на принциповій схемі (рисунок 2). При цьому КГУ має працювати не за середньодобовим навантаженням ГВС у будній день опалювального періоду, а за базовим навантаженням вихідного дня опалювального періоду, а саме на 1,897 МВт. На покриття потреб ГВП, а також для зарядження/розрядження БА буде витрачатися теплота у кількості 1,309 МВт (середньодобове навантаження ГВС у будній день опалювального періоду). Залишок у 0,588 МВт спрямовується до котельні. Для цієї схеми передачу теплоти таким чином можна здійснювати цілодобово.

Висновки. Застосування децентралізованої системи тепlopостачання житлових, адміністративних і виробничих будівель на базі теплонасосної установки має певні технологічні та екологічні переваги, порівняно із традиційною схемою теплофікації. Схема КГУ-ТНУ, що працює на стічних водах, із баком-акумулятором є рентабельною, оскільки за її упровадження відбувається економія палива.

Література

1. Яндульський О.С. Практичне впровадження теплових насосів та комплексне енергозабезпечення об'єктів соціальної та промислової галузі України / О.С. Яндульський // Энергетика и электрификация. – 2008. – № 2. – С. 44-46.
2. Сафьянц С.М. Исследование схемы источника теплоэлектроснабжения с регулированием нагрузок на базе использования тепловых насосов / С.М. Сафьянц, Н.В. Колесниченко, Т.Е. Веретенникова. // Коммунальная и промышленная теплоэнергетика. – 2011. – № 3. – С. 79-85.
3. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учеб. для вузов / Е.Я. Соколов. – 7-е изд., стереот. – М.: МЭИ, 2001. – 472 с.
4. Программа McQuay (США) для выбора Water cooled liquid chillers.