

IDENTIFICARE A UNOR SISTEME DE TERMOFICARE CU CET ȘI POMPELE DE CĂLDURĂ

STUDY OF THE DISTRICT HEATING SYSTEMS WITH CHP AND HEAT PUMPS

Mihail ȘIT¹, Anatoly JURAVLEOV²,
Dmitry SUVOROV³, Larisa SUVOROVA⁴

Abstract: *The work relates to the problems of using heat pumps in district heating systems. The aim of the study is to increase the energy economic efficiency of combined heat supply systems with heat pumps using natural refrigerants. This goal is achieved by developing a scheme of the system in which part of the building is heated centrally from the CHP, and the other part is from a heat pump installed in the building, and heat pump which receives low potential heat from the return network water leaving the part of the building, - centralized, and from outside air.*

Keywords: district heating, heat pumps, carbon dioxide.

Rezumat: *Lucrarea se referă la problemele utilizării pompelor de căldură în sistemele de termoficare. Scopul studiului este de a spori eficiența energetică a sistemelor de furnizare a căldurii cu pompe de căldură cu dioxid de carbon. Obiectivul este atins prin elaborarea unor diagrame ale sistemelor în care o parte a clădirii este încălzită de agentul termic furnizat de către CET-uri, iar altă parte de pompă de căldură instalată într-un centru individual de încălzire a edificiului, care absoarbe surplusul de căldură de agentul termic cu potențial termic scăzut din conducta retur la ieșirea din clădire, precum și absorbită din aerul din exterior.*

Cuvinte cheie: termoficare, pompe de căldură, dioxid de carbon.

1. Introducere

¹ D.ș.t., Institutul de Energetică, Chișinău, Republica Moldova, e-mail: mihail_sit@mail.ru

² D.ș.t., Institutul de Energetică, Chișinău, Republica Moldova, e-mail: AZur5249@mail.ru

³ D.ș.t., Universitatea de Stat din Vyatka, Kirov, Federația Rusă, e-mail: dmilar@mail.ru

⁴ D.ș.t., Universitatea de Stat din Vyatka, Kirov, Federația Rusă, e-mail:

larsuvorova@mail.ru

Lucrarea se referă la domeniul de utilizare a pompelor de căldură în sistemele centralizate de alimentare cu căldură. Este cunoscută lucrarea [1], în care dintr-un sistem centralizat de alimentare cu căldură printr-un schimbător de căldură, agent termic este furnizat cu temperatură constantă sau variabilă într-un cazan- utilizator de căldură. În același cazan-utilizator de căldură se duce energie termică: de la cazanele care funcționează pe diverse tipuri de combustibil, de la colectoarele solare, de la pompele de căldură și de la surse de energie termică secundară. În [2], este studiat un sistem de încălzire combinat format dintr-o pompă de căldură cu compresie de vapori (PC) și o centrală termică (CT).

În această lucrare, s-a marcat faptul că pentru toate modurile de funcționare separată a pompei de căldură cu compresie de vapori și a centralei termice, temperatura ridicată a sursei cu potențial scăzut permite reducerea lucrului mecanic de compresie în PC și reducerea consumului de energie electrică, creșterea coeficientului de conversie a energiei și reducerea consumului de combustibil convențional. În [3] a fost propusă o schemă pentru încorporarea unei instalații de pompă de căldură într-un sistem de încălzire și alimentare cu apă caldă. Se propune utilizarea unei pompe de căldură pe R134a. În articole se propune utilizarea răcirii unei părți a apei din rețeaua de retur și reducerea consumului de apă directă din rețea datorită căldurii prelevate din apa rețelei de retur. Sunt cunoscute lucrările Școlii termotehnice din Novosibirsk [4,5], care iau în considerare atât pompele de căldură cu absorbție, cât și pompele de căldură cu compresie de vapori. Problemele legate de funcționarea sistemului de alimentare cu apă caldă nu sunt luate în considerare în lucrările acestea.

Printre lucrările autorilor occidentali, remarcăm [6], în care metoda de modelare matematică este folosită pentru a studia sistemul de încălzire cu pompă de căldură centrală (PCC) și PC auxiliare plasate la consumatorii. În lucrare, este studiat un model care raportează temperaturile rețelei, pierderile și valorile COP din sistem. Folosind acest model, a fost investigat un sistem de încălzire cu temperatură joasă (de tip „pardoseală caldă”) și un sistem de apă caldă menajeră. În [7], au fost luate în considerare diagrame bloc ale sistemelor de încălzire cu surse de căldură cu potențial scăzut (SCPS) sub formă de aer, ape subterane și ape de mare, precum și o combinație a celor trei SCPS. În [8], este prezentată revista literaturii asupra sistemelor europene moderne care utilizează pompe de căldură în sistemele de alimentare cu căldură. De asemenea, sunt cunoscute sistemele care utilizează apa retur de rețea pentru pompele de căldură instalate în rețele cu un graficul de reglare a temperaturii redus pentru centralele termice pentru încălzirea apei la

consumator, de exemplu, [9]. În [12] sunt prezentate cantitatea mare a articolelor savanților de West legate cu utilizarea pompelor de căldură legate cu CET în sistemele de încălzire a blocurilor. În [13] se studiază încălzire a blocurilor au sistemul ”pardoseală caldă” și utilizare apei de mare și aerului exterior ca SCPS.

Pentru a îndeplini cerințele privind eficiența energetică și încălzirea clădirilor, legislația națională din toate țările UE încurajează opțiuni de încălzire și răcire mai durabile.

Una dintre ele este o pompă de căldură cu tehnologii pompelor de căldură de absorbție și pompelor de căldură cu compesie de vapori. În [16], sunt identificate schemele pentru utilizarea căldurii apei retur din rețea ca SCPS pentru pompe de căldură. Aproape de sistemele luate în considerare în acest articol sunt sisteme în care pompa de căldură utilizează apa retur de rețea ca sursă de căldură și concomitent aer exterior.

O caracteristică a sistemelor luate în considerare anterior este faptul că temperatura sistemului de alimentare cu apă caldă de consum menajeră este întotdeauna mai mare decât temperatura apei de rețea directă livrată de mini-CET, care nu și-a găsit încă aplicarea în Republica Moldova sau în Federația Rusă, unde sunt utilizate pe scară largă CET de capacitate mare.

Scopul lucrării prezentate este majorarea eficienței energetice a sistemelor combinate de livrare a căldurii cu pompe de căldură cu dioxid de carbon ca agent frigorific. Acest obiectiv este realizat prin identificarea unor scheme de sisteme în care o parte a clădirii este încălzită centralizat din CET, iar cealaltă parte este încălzită de la o pompă de căldură instalată într-un punct individual de încălzire a clădirii, primind căldură din rețeaua de retur de apă care iese din partea clădirii, încălzită centralizat, sau a două parte a clădirii este încălzită cu purtător de căldură, care iese din prima parte a clădirii, sau clădire este încălzită cu apă tur de CET cu graficul termic de reglare scăzut, iar pompa de căldură instalată în paralel cu sistemul de încălzire a clădirii se încălzește clădire cu graficul ridicat de încălzire.

Rezultatele cele mai semnificative ale lucrării sunt schema a unei pompe de căldură cu dioxid de carbon, care combină atât posibilitățile de a lucra într-un sistem de alimentare cu căldură cu reglarea calitativă și cantitativă, cât și atunci când pregătiți apa caldă pentru clădiri într-o perioadă care nu este de încălzire.

Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că soluții tehnice propuse permite reducerea a consumului de combustibil pentru centralele termice și a costurilor consumatorilor atunci când plătesc pentru energia consumată.

2. Cerințele tehnice ale sistemului și elementelor lui

Întrucât baza unui sistem distribuit de producere a căldurii într-un sistem combinat de alimentare cu căldură (SCT) este o pompă de căldură cu dioxid de carbon, vom analiza mai întâi evoluțiile principale din acest domeniu pentru a determina design-urile raționale ale pompelor de căldură. Este cunoscută o lucrare [10], în care sunt analizate ultimele elaborări pentru 2019 pe această temă. Alegerea noastră s-a bazat pe dioxidul de carbon, deoarece refrigerantul trebuie să fie natural, netoxic, neinflamabil, să îndeplinească clasa de siguranță A1 ASHRAE și care poate fi trimis în mediu, să aibă GWP=1 și ODP = 0.

Conținutul de CO₂ din mediu (0,04% din volumul de aer atmosferic) îl face rentabil. Chimic, CO₂ este un gaz inert și, în conformitate cu standardele de siguranță ASHRAE 15 și 34 și ISO 5149, CO₂ este un agent frigorific inofensiv. Prin urmare, există probleme minime în cazul în care pot apărea scurgeri. Pompa de căldură pentru producerea apei calde trebuie să funcționeze la temperaturi ambiante de la 6°C la 46°C. COP al acestei pompe de căldură trebuie să fie de cel puțin cinci. Temperatura agentului frigorific după răcirea cu gaz a acestei pompe de căldură trebuie să fie de cel puțin 65°C (pentru a asigura o protecție antibacteriană a apei). Temperatura punctului de funcționare la intrarea în compresor nu trebuie să fie mai mică de 20 ... 25°C. Pompa de căldură pentru apa caldă menajeră funcționează în modul „pornire-oprire”.

O pompă de căldură pentru încălzire în timpul funcționării într-un reglare a temperaturii calitativ trebuie să satisfacă următoarele cerințe: să funcționeze într-un program de temperatură de încălzire de 70/40 sau mai mic, să aibă o intrare de aer pentru reglarea intercoolerului fluidului de lucru după prima treaptă a compresorului. La agregarea unei pompe de căldură pentru a pregăti apa caldă într-un sistem de aer condiționat, aceasta trebuie să fie echipată cu un acumulator de frig.

Pe baza analizei literaturii [10], două cicluri au fost selectate pentru analiză: cu două trepte cu un intercooler și cu un singur stadiu cu un ejector.

Alegerea acestor cicluri se bazează pe faptul că utilizarea legilor de control calitative și cantitative pentru pompele de căldură întâmpină o serie de dificultăți asociate controlului simultan al presiunii compresorului și a punctului de operare la intrarea compresorului. Întrucât pompa de căldură pentru încălzirea clădirii trebuie să asigure simultan sarcinile de preparare a apei calde în perioada de vară, schema care combină atât pompa de căldură cu

două trepte, cât și ejectorul ca componentă este, în ciuda costului crescut, rațional [18, 19].

Dacă pompa de căldură trebuie să funcționeze la un debit de agent frigorific variabil sau la o presiune variabilă a compresorului, atunci schimbătorul de căldură intern al acestei pompe trebuie să aibă și o zonă de schimb de căldură variabilă, deoarece punctul de operare la intrarea compresorului trebuie să fie stabilizat. În plus, lucrul cu un sistem de control cantitativ necesită utilizarea unor moduri de temperatură joasă de funcționare a sistemelor de alimentare cu căldură, astfel încât acestea să ofere COP maxim al pompelor de căldură. Cu legea cantitativă de dirijare a sistemului de alimentare cu căldură, va fi necesară modificarea rețelelor interne de încălzire a clădirilor și schimbarea suprafețelor de transfer de căldură ale radiatoarelor.

3. Descrierea variantelor sistemelor de încălzire

Schema sistemului "CET - pompe de căldură locale" pentru un sistem de alimentare cu căldură (SAC) cu o lege calitativă a dirijării termice este prezentată în Fig. 1. Schimbătorul de căldură a sistemului de preparare a apei calde menajeră este conectat la rețea prin schema paralelă.

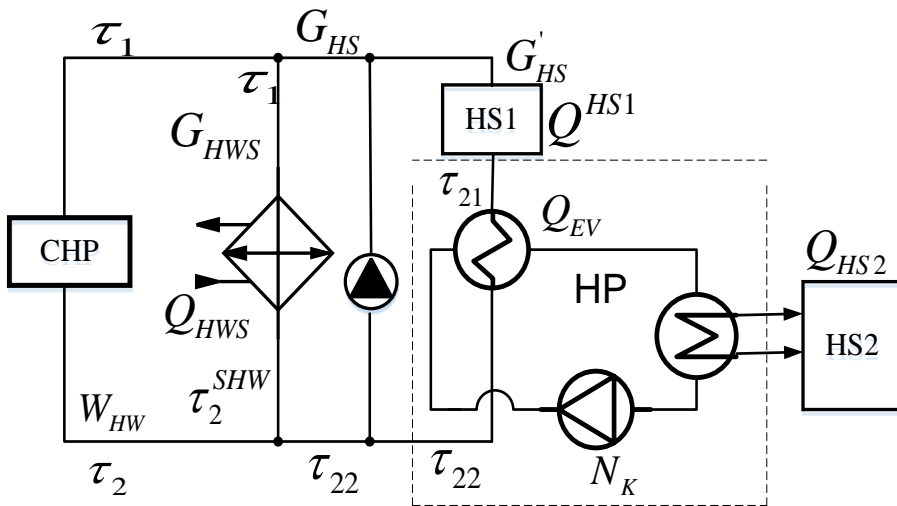


Figura 1 – Schema de alimentare cu căldură, varianta 1

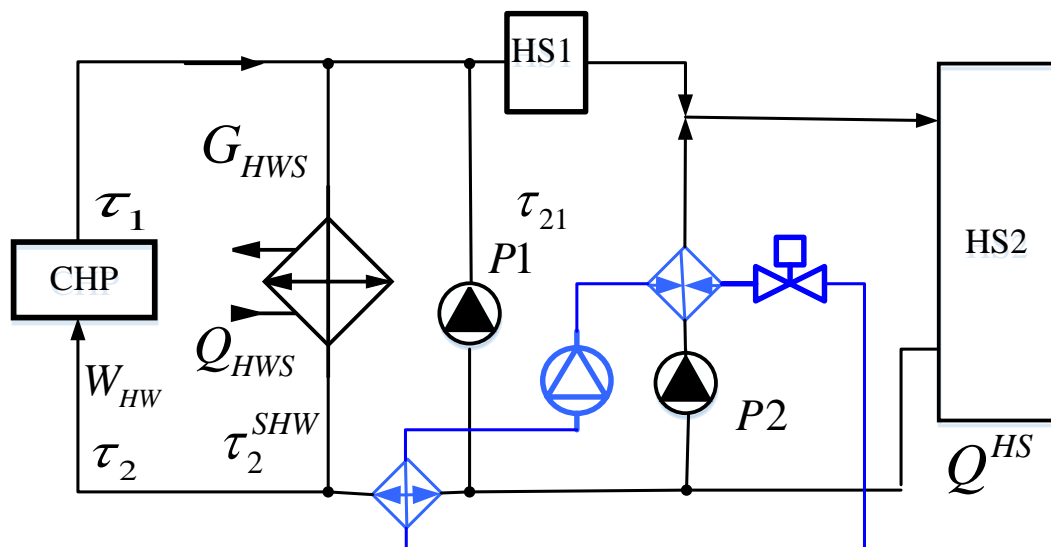


Figura 2 – Schema de alimentare cu căldură, varianta 2

În schema se utilizează concomitent căldură din apa retur a rețelei a unei părți a clădirii și căldură din aerul exterior pentru a încălzi o altă parte a clădirii în perioada de încălzire. Încălzire, iar restul anului, apa caldă menajeră este generată de pompa de căldură existentă.

Întreaga clădire primește energie termică pentru apa caldă menajeră din CHP în perioada de intersezon.

Evident, răcirea apei din rețeaua de retur pentru o parte a clădirii, căldură pentru cealaltă parte este furnizată cu o pompă de căldură folosind căldura rețelei de retur de apă care iese din partea clădirii încălzită de la centrala termică, ar trebui să producă efect atunci când două evaporatoare sunt utilizate în paralel în pompa de căldură: unul folosind temperaturii apei de retur, cealaltă - căldura aerului exterior și / sau căldura din alte surse de căldură. (În ultimul caz, va fi nevoie de mai mulți evaporatori). Schema de conectare a pompei de căldură cu sistemul de alimentare cu căldură (SAC) cu legea calitativă a managementului termic este prezentată în Fig. 1.

4. Graficile temperaturilor apei tur și retur în dependență de condiții meteo

Sunt cunoscute publicări în care sunt luate studiate [1, 12, p.29] sistemele de alimentare cu căldură de temperatură medie și joasă, inclusiv sisteme CHP-pompe de căldură(PC) și lucrări [3], unde investigate diverse

variante de utilizare a pompelor de căldură în sistemele de alimentare cu căldură, în special: la conexiune dependentă și independentă a sistemelor de încălzire. O analiză a acestor lucrări ne permite să concluzionăm că cea mai importantă condiție pentru posibilitatea utilizării PC ca surse de căldură directe pentru circuitele de încălzire este proiectarea sau reconstrucția sistemelor de încălzire a clădirii, ținând cont de temperatura maximă a fluidului de răcire din circuitul de încălzire la sarcina nominală, care depinde în primul rând de caracteristicile specifice de încălzire ale clădirii kF (W / K).

În [1], s-a arătat, că la reconstrucția clădirilor și modernizarea sistemelor de încălzire, sarcinile calculate de încălzire pot fi reduse semnificativ, ceea ce face posibil transferul unor astfel de sisteme într-un program de reglare a temperaturii mai scăzută în dependența de la temperatura aerului calculat (de exemplu, de la $95/70^{\circ}C$ la $70/40^{\circ}C$). În același timp, în această lucrare se arată că pentru o serie de clădiri construite anterior (de exemplu în regiunea Harkov), datele reale privind valoarea kF sunt mai mici decât valorile calculate, ceea ce necesită o temperatură ridicată a lichidului din conducta de alimentare. Astfel, transferului al clădirilor sau al părților lor într-un graficul de temperatură de încălzire mai scăzut ar trebui să fie precedat de o analiză calculată a stării reale a acestor sisteme și, eventual, reconstrucția clădirilor și a sistemelor de încălzire cu o creștere a eficienței energetice a acestora.

După cum arată analiza, pentru condițiile de utilizare a dioxidului de carbon ca fluid de lucru, graficele de temperatură ale rețelelor de căldură pot asigura funcționarea sistemelor de încălzire și a consumatorilor de apă caldă. În acest caz, graficele de temperatură pentru apa de rețea a preparare a apei calde de consum (PAC) sau a centralei termice pot fi semnificativ mai mari în ceea ce privește temperatura maximă în linia de alimentare (de la $115^{\circ}C$ la $150^{\circ}C$ în circuitele independente și circuitele de amestec la unitățile de încălzire (încălzire centrală și unități de încălzire industrială) decât pentru consumatorii de încălzire.

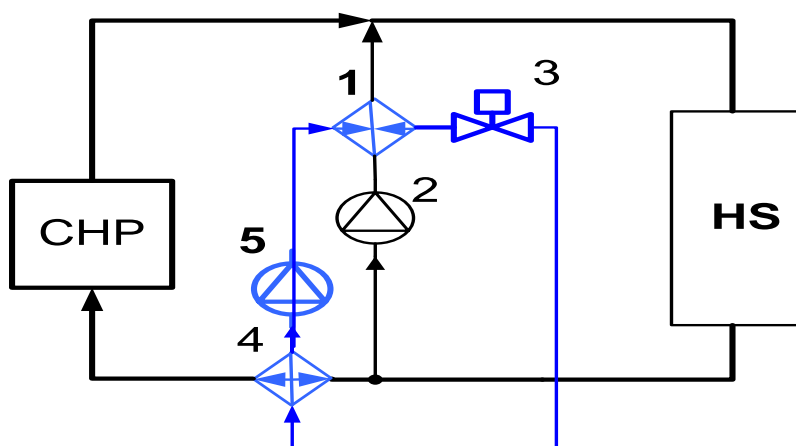


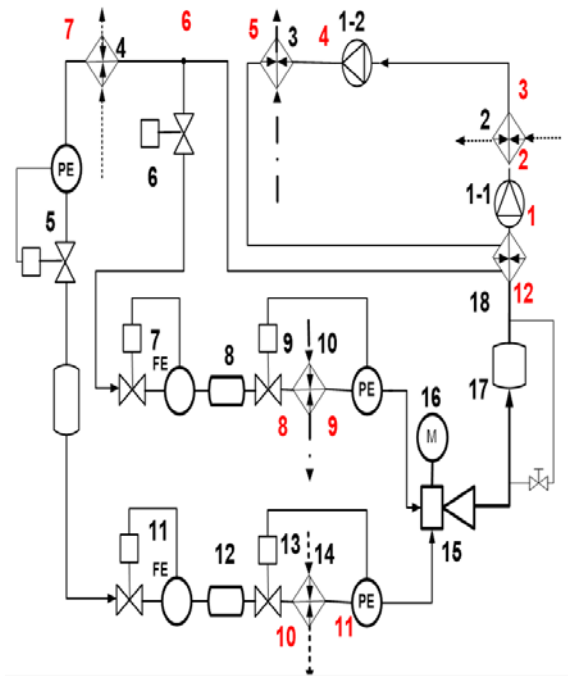
Figura 3 – Schema de alimentare cu căldură, varianta 3

Mai devreme, la proiectarea unor astfel de sisteme în țările fostei URSS, programul de reglare a temperaturilor tur/retur apei de rețeaua termică 95/70 a fost utilizat pe scară largă pentru consumatorii de încălzire, iar în proiectele moderne de construcții cu eficiență energetică ridicată, sisteme de încălzire cu temperatură medie și joasă, cu o temperatură estimată de răcire de 70/50 și chiar de mai jos. În toate aceste cazuri, temperatura calculată a apei de rețea în linia de retur a rețelei de încălzire, ținând cont de sarcina termică atât a apei de încălzire, cât și a apei calde menajere, variază în intervalul de la 40°C la 70°C (pe întreg intervalul graficului de temperatură), ceea ce face posibilă utilizarea unei părți din potențialul termic și de temperatură al rețelei de retur. apă în sistemele de încălzire cu pompe de căldură (atât pentru încălzire, cât și pentru apa caldă menajeră).

În același timp, intervalul de temperatură minimă al apei de rețea de retur răcite când se utilizează dioxid de carbon ca mediu de lucru poate fi redus la nivelul de 15-20 ° C, iar programele de temperatură ale sistemelor de încălzire conectate la HPP sau transferate la încălzirea de la HPP nu trebuie să depășească 70 ° C linia de curgere a circuitului de încălzire la temperatura de proiectare a aerului exterior [12]. Astfel de condiții pot fi îndeplinite la proiectarea de noi sisteme de încălzire la temperatură medie și joasă, precum și la reconstrucția sistemelor proiectate anterior, luând în considerare o scădere a încărcării calculate de încălzire prin reducerea pierderilor de căldură în clădiri sau prin adăugarea suprafețelor de încălzire la suprafețele (zonele) de încălzire suplimentare ale dispozitivelor de încălzire.

4. Particularitățile schemei pompei de căldură

Particularitatea schemei (Figura 4) este că regulatoarele de debit de gaze prin evaporatoare sunt situate în fața regulatoarelor de presiune ale evaporatorului și că presiunea diferențială asupra acestora depinde mai mult de debit decât presiunea diferențială pe regulatoarele de presiune. Rezervoari 8,12 servesc pentru a asigura funcționarea fiabilă a supapelor 7, 11 într-un mediu lichid. Ejectorul 15 servește la amestecarea gazelor la ieșirea din evaporatoarele 10 și 14. În acest articol, este luată în considerare o schemă cu două ejectoare. Utilizarea celui de-al doilea ejector conectat între evaporatoare și compresor va fi discutată în articolul următor. Particularitatea schemei constă în faptul, că regulatoarele de debit de gaze prin evaporatoare sunt situate în fața regulatoarelor de presiune a evaporatorului și că presiunea diferențială asupra acestora depinde mai mult de debit decât de presiunea diferențială asupra regulatoarelor de presiune. presiunea evaporatorilor și ce scădere a presiunii asupra lor.



A. Liniele punctate cu linie –apă, Liniele punctate – aer, liniile solide – agent frigorific. 1-1, 1-2 – compresoare, 2 – răcitorul de gaze a treptei întâia a compresorului, 3 – răcitorul de gaze pentru sistemul de încălzire, 4 – suprarăcitorul de gaze, 5, 6 – regulatoarele de presiune ale evaporatizatoarelor, 7,11- regulatoarele de debit a agentului frigorific prin evaporatizatoarele, 8 și 10, 12 – rezevoarele pentru stabilizarea regimurilor supapelor 7 și 11, 9, 13 – regulatoarele de supraîncălzire a gazului după evaporatizatoarele 10 și 14, 15 – ejector cu acționarea reglabilă.

5. Eficiența economică pentru consumator datorită utilizării sistemelor” CET-pompe de căldură locale”

Eficiența economică pentru consumator rezultă din economiile costurilor de energie ca urmare a înlocuirii (parțial sau complet) a sursei de energie termică. Mai mult, aceste economii ar trebui să fie suficiente pentru a compensa toată investiția cheltuită pentru schimbarea sursei de furnizare de energie într-un interval de timp acceptabil. În acest sens, este necesar să se determine: costurile locuitorilor casei pentru plata energiei termice consumate din rețelele centrale pentru încălzire și pregătirea apei calde; cheltuieli pentru plata energiei electrice consumate; componența și valoarea costurilor de capital pentru modificarea sursei de alimentare cu energie. Costurile anuale medii (folosind exemplul unei clădiri cu 100 de apartamente (în conformitate cu schimă figura 2) ca scenariu de analiză a eficienței utilizării HPU), furnizarea de energie a casei a fost determinată pe baza facturilor pentru plata căldurii și a energiei electrice consumate.

În medie, o astfel de casă necesită de 781 Gcal / an de energie termică (TE) pentru încălzire și apă caldă, care în termeni monetari constituie de 877,4 mii lei pe an. În conformitate cu aceasta, costurile de capital necesare, ținând cont de costul de proiectare, instalare și punere în funcțiune, la un cost de 1 kW de capacitate termică de PC egală cu 400 de euro, se vor ridica la 700 de mii de lei. Componența costurilor de funcționare după modernizare include: energia electrică consumată de PC pe parcursul anului, bani care trebuie plătiți furnizorului de servicii, deoarece, în această schemă, PC va genera, în medie, 42,3% din suma necesară pentru o casă, baterie de combustibil. După modernizare, costul unei case pentru pilele de combustibil se va ridica la 676,8 mii de lei pe an. Astfel, perioada de rambursare simplă a costurilor de capital a fost de 3,5 ani.

6. Concluzii

1. Schema unui sistem de alimentare cu căldură cu o centrală termică și o pompă de căldură, în care pompele de căldură primesc căldură din apa rețelei de retur și din aerul din jur, economisesc energie electrică, gaze naturale și bani pentru plata facturilor de la consumatori.
2. Circuitul pompei de căldură cu dioxid de carbon trebuie să includă cel puțin două compresoare (sau un compresor cu două trepte) și unul sau două ejectoare.

3. Încorporarea în schemă a supercoolerului al agentului frigorific după răcitorul de gaz poate asigura reglarea modului de funcționare a evaporatorului în canalul de aer exterior pe o gamă largă de temperatură.
4. Schimbătorul de căldură intern și răcitorul de gaze trebuie să fie realizate cu o suprafața de schimb de căldură variabilă.
5. Implementarea în practică al sistemului propus în conformitate cu schema propusă poate fi rentabilă pentru consumatorii noi de căldură care sunt conectați la CET sau la o centrală termică de asemenea, duce la o scădere a consumului suplimentar de combustibil la sursa necesară pentru furnizarea de căldură consumatorilor nou conectați, însă acest lucru necesită tehnici mai detaliate și mai detaliate calcule economice.

REFERENCES

- [1] A.A.Redko, A.M. Taradai, V.V. Chernokriluk., T.S. Esin Kombinirovannii sistemi teplosnabjennia s vozobnovliaemimi istochnikami tepla. [Parameters of a Heat Supply System at a Lower Temperature Chart], Enegroshberejennie, energe-tika, energoaudit [Energy saving, energetics, energy audit]. 199(29)2014, p.42-46. <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/33556/30109> , accessed 19.02.2020
- [2] L.A. Ogurechnikov Resursosberegaiuschaia kombinirovannaia sistema teplosnabjennia. [Resources saving combined heat supply system]. https://vodapol.ru/Arts/Resursosberegayushaya_sistema.php , accessed 19.02.2020.
- [3] R.A. Musabekov, Abilidinova S.K., Rasmuhametova A.S. Effektivnosti system centralizovannogo teplosnabjennia v usloviah sovместnogo ispolizovania teolovih nasosov. [Efficiency of district heating systems under conditions of joint usage of heat pumps]. Vestnik AUES [Herald of AUEC] Almaty: AUEC, 2017.- №1(36). - p.5-19.
- [4] G.V.Nozdrenko Kompleksnii exergeticheskii analiz energoblokov TES s novimi tehnologiami [Complex exergetic analysis of CHP with new technologies] Novosibirsk, 2009.
- [5] A.A. Frantseva Optimizatsionnie issledovania TETS s gazosetevimi podogrevateliami. [Optimization studies of thermal power plants with a gas network heater and freon thernotransformers]. Novosibirsk, 2015. https://нгу.рф/files/dissertations/dissertaciya_franceva_142916052027.pdf (accessed 21.03.2020).
- [6] P.A. Østergaard, A.N.Andersen Booster heat pumps and central heat pumps in district heating. Applied Energy 184 (2016) 1374–1388.
- [7] H. Pieper, T. Ommen, B. Elmgaard, W.B.Markussen Assessment of a combination of three heat sources for heat pumps to supply district heating. Energy 176 (2019) 156-170.
- [8] M.A.Sayegh, P.Jadwiszczak, B.P.Axcell, E.Niemierka, K.Brys, H.Jouhara Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating. Energy & Buildings 166 (2018) 122–144.
- [9] A.V.Ovsianik, I.I. Matsko, O.L. Rychter, S.O.Bobovich Perspektivi primennenia teplonasosnih tehnologii d teplofikatsionnom kompexe goroda Gomelia [Prospects for the use of heat pump technologies in the heating complex of the city of Gmel]. <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/10175/%D0%9E%D0%B2%D1%81%D1>

[%8F%D0%BD%D0%BD%D0%B8%D0%BA%2C%20%D0%90.%20%D0%90.%20%D0%9F%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D1%8B...pdf?sequence=1&isAllowed=y](#) (accessed 21.03.2020).

- [10] *R.U. Rony, H. Yang, S. Krishnan, J. Song* Recent Advances in Transcritical CO₂ (R744) Heat Pump System: A Review. *Energies* 2019, 12, 457; doi:10.3390/en12030457.
- [11] *Ma Yitai, Liu Zhongyan, Tian Hua* A review of transcritical carbon dioxide heat pump and refrigeration cycles. *Energy*. 55 (2013), p.156-172.
- [12] *T.S. Ommen* (2015). *Heat Pumps in CHP Systems: High-efficiency Energy System Utilising Combined Heat and Power and Heat Pumps*. DTU Mechanical Engineering. DCAMM Special Report, No. S187.
- [13] *P.A. Østergaard, A.N. Andersen* Economic feasibility of booster heat pumps in heat pump-based district heating systems. *Energy* 155(2018), 921-929.
- [14] *T. Ommen, W.B. Markussen, B. Elmegaard* Heat pumps in combined heat and power systems, *Energy* 76 (2014) 989–1010. <https://doi.org.1016/j.energy.2014.09.016> .
- [15] *N.V. Tatarinova, D.M. Suvorov, A.G. Shempelev* Approaches to building computational mathematical models based on the flow and power characteristics of cogeneration steam turbine stages and compartments. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017). St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 1-6.
- [16] *E.A. Groll, J.H. Kim* 2007. Review of recent advances toward transcritical CO₂ cycle technology. *HVAC&R Research*, **13**(3):499-520.