

УДК 621.18-182.2

Чисельне моделювання параметрів теплової схеми системи утилізації відхідної теплоти

Ю. О. Бурда¹, Ю.О. Півненко², І.О. Редько³, А. Д. Череднік⁴, О. В. Приймак⁵

¹к.т.н., асист. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, burda.yurii.1991@gmail.com, ORCID 0000-0003-3470-1334

²к.т.н., асист. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, Pivnenko.Yura@gmail.com, ORCID 0000-0002-6675-2649

³д.т.н., проф. Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна, germes_s2006@ukt.net, ORCID:0000-0002-9863-4487

⁴к.т.н., асист. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, artemcherednicc@gmail.com ORCID 0000-0002-3385-0584

⁵д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, O2opriymak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9515-9879

Анотація. Гібридні енергетичні установки вперше запропоновано при розробленні геотермальних родовищ Камчатки в 1964-66 роках. Установка складається з двох контурів, у яких використовується турбіна на водяній парі з температурою до 200 °С і ступенем сухості 5 % і турбіна на хладоні R 12 потужністю 5 МВт. Електрична потужність становить 12 МВт. Гібридні енергетичні установки також використовуються в металургії, цементній і скляній галузях промисловості, де використовується теплота відхідних газів з температурою до 350 °С. Особливістю проектних розрахунків є невизначеність зміни протягом майбутнього терміну експлуатації частини початкових даних, зокрема питомих вартісних показників. Збільшення кількості елементів схем та можливих комбінацій їх з'єднань між собою, розширення діапазонів змін початкових даних, фактори системності та невизначеності значно ускладнюють вибір остаточного варіанта теплової схеми. Розрахункові дослідження показали доцільність використання двоконтурної схеми зі збільшеною витратою органічного робочого тіла порівняно з триконтурною. Це незначно зменшує потужність, однак суттєво спрощує і здешевлює систему.

Ключові слова: чисельне моделювання, системи утилізації відхідного тепла, геотермальна електростанція, гібридні енергетичні установки

Вступ. Сталий розвиток міських систем теплопостачання передбачає їхню динамічну еволюцію спільно з іншими енергетичними системами. Факторами сталого розвитку міських систем теплопостачання є:

- екологічні;
- містобудівні;
- інфраструктурні;
- економічні.

Актуальність дослідження. Гібридні енергетичні установки були вперше запропоновані при розробці геотермальних родовищ Камчатки в 1964-66 роках. Установка складається з двох контурів, в яких використовується турбіна на водяній парі з температурою до 200 °С при цьому ступінь сухості водяної пари становить 5% і турбіна на хладоні R12 потужністю 5 МВт [1]. Електрична потужність становить 12 МВт. Гібридні енергетичні установки також використовуються в металургії, цементній і скляній галузях промисловості де використовується теплота відхідних газів з температурою до 350 °С.

Утилізація теплоти відхідних газів і долучення систем утилізації теплоти відхідних газів (WHRS – Waste Heat Recovery System) до міських систем теплопостачання підвищує

стійкість останніх. Розрізняють різні WHRS.

Останні дослідження та публікації. Значний внесок у дослідження даної теми зробили М. Ф. Боженко, Ю. О. Гічов, О. М. Головченко, О. Ф. Редько, В. В. Студинський, І. В. Штуй та інші [1-20].

Задача підвищення ефективності використання енергоресурсів призводить до переходу від типових теплових схем до індивідуальних схем, ускладнених турбінами, двигунами внутрішнього згоряння, тепловими насосами, гібридними енергетичними установками тощо. Системний характер означеної задачі викликає необхідність її розгляду в комплексі з екологічними, біологічними, економічними й технічними проблемами. [2-4]

Особливістю проектних розрахунків є невизначеність зміни протягом майбутнього терміну експлуатації частини початкових даних, зокрема питомих вартісних показників. значно ускладнюють вибір остаточного варіанта теплової схеми [5-6]:

- збільшення кількості елементів схем та можливих комбінацій їхніх з'єднань між собою;
- розширення діапазонів змін початкових даних;

- фактори системності та невизначеності.

Формулювання цілей статті. Підтвердити доцільність утилізації теплоти відхідних газів з виробництвом електроенергії у міських системах теплопостачання.

Основна частина. Виконаємо чисельне дослідження дво- та триконтурної схем систем утилізації теплоти відхідних газів (рис. 1) в умовах, характерних для міської системи теплопостачання. Температура джерела теплоти становить 623,15 К (350 °С), параметри вологої пари: температура пари $T = 523,15$ К (250 °С), тиск пари $P = 3976$ кПа, ступінь сухості пари $x = 0,5$. Масова витрата води в першому контурі становить $G = 1,24$ кг/с. З метою підвищення ефективності енергетичного циклу та зменшення температури відхідних газів досліджено можливість максимального випарювання води та збільшення витрати води у циклі. [9-11].

У результаті розрахунку триконтурної схеми (рис. 1б) отримано параметри робочих тіл у табл. 1. Загальна потужність виробленої електроенергії з урахуванням коефіцієнта корисної дії генераторів та потужності насоса СР становить 491,5 кВт, що є суттєвим внеском до системи електропостачання.

Замінімо органічне робоче тіло третього контура на те ж, що і в другому – R152a [7-8]. Отримаємо потужність турбін

- парової – 273,0 кВт;
- на органічному робочому тілі – 171,2 та 92,1 кВт.

Загальна електрична потужність досягає

502,9 кВт, тобто зростає на 2 %.

Порівняємо результати з двоконтурною схемою (рис. 1а). Витрати робочого тіла другого контура підвищено з метою зниження температури відхідних газів [17-20].

У результаті маємо параметри робочого тіла в табл. 2. При цьому термодинамічні параметри на вході та виході турбін залишаються тими ж. Отримаємо потужність турбін

- парової – 273,0 кВт;
- на органічному робочому тілі – 171,2 та 227,1 кВт.

Загальна електрична потужність досягає 486,9 кВт, тобто зменшується на 0,94 % порівняно з першим випадком та 3,18 % – з другим. Така втрата потужності є несуттєвою порівняно зі зростанням складності та вартості на влаштування триконтурної схеми.

Висновки. Проведені розрахункові дослідження дво- та триконтурної теплової схеми (за умови температури скидної теплоти 623,15 К або 350 °С) показали доцільність утилізації теплоти відхідних газів з виробництвом електроенергії. Найбільш доцільним є реалізація саме двоконтурної теплової схеми з підвищенням витрати органічного робочого тіла. Це призводить до значного спрощення та здешевлення обладнання з несуттєвим зменшенням потужності

Перспективи подальших досліджень. В подальшому плануються дослідження для гібридних установок за іншими робочими тілами.

Література

1. Redko I. Energy efficiency of buildings in the cities of Ukraine under the conditions of sustainable development of centralized heat supply systems / I. Redko, A. Ujma, A. Redko, S. Pavlovskiy, O. Redko, Yu. Burda // Energy and Buildings. – 2021. – Vol. 247. – 110947. – <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110947>
2. Шарапов В. І. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения / В. І. Шарапов, П. В. Ротов. – Москва: Издательство "Новости теплоснабжения", 2007. – 164 с.
3. Redko A. Aerodynamic Processes and Heat Exchange in the Furnace of a Steam Boiler with a Secondary Emitter / A. Redko, R. Dzhyoiev, A. Davidenko, A. Pavlovskaya, S. Pavlovskiy, I. Redko, N. Kulikova, O. Redko // Alexandria Engineering Journal. – 2019. – Vol. 58, Iss. 1. – P. 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.12.006>.
4. Кувшинов Ю.Я. Основы обеспечения микроклимата зданий / Ю. Я. Кувшинов, О. Д. Самарин. – Москва: Издательство АСВ, 2012. – 198 с.
5. Самарин О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность / О. Д. Самарин // Москва: Изд-во АСВ. – 2014. – 296 с.
6. Redko A. Simulation and optimization of heat-exchanger parameters of heat pipes by changes of entropy / A. Redko, N. Kulikova, O. Redko, S. Pavlovskiy // Heat Transfer Research. – 2018. – Vol. 49. – Iss. 16. – P. 1545-1557. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2018019336
7. Седнин В. А. Оптимизация параметров температурного графика отпуска теплоты в теплофикационных системах / В. А. Седнин А. В. Седнин, М. Л. Богданович // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2009. – №4. – С. 55-62.
8. Дорошенко Ж. Ф. О целесообразности использования пониженного графика работы цст муниципальных систем теплоснабжения / Ж. Ф. Дорошенко, Г. И. Ковальчук, М. Д. Потапов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2017, 17-19 травня 2017р.: у 4 ч. Ч. III. – Харків: НТУ «ХПІ». – р. 24. – URL: http://pim.net.ua/arch_f_tez_mic_17_III.pdf

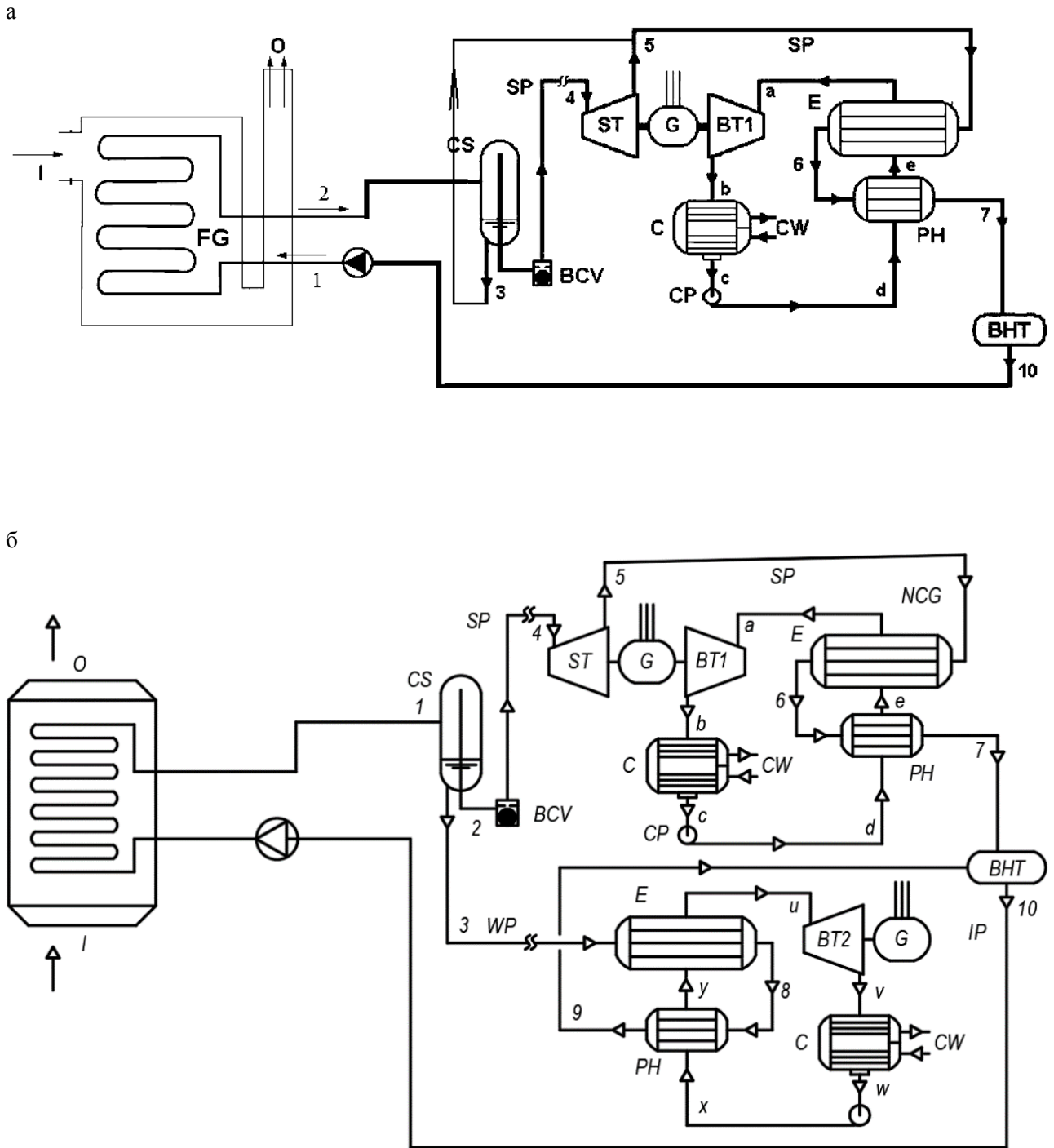


Рис. 1. Теплова схема WHRS: а – двоконтурна; б – триконтурна:

FG – котел-утилізатор; CS – сепаратор; SP – паропровід; ST – турбіна на водяній парі; G – генератор; BT1 і BT2 – турбіни на органічних робочих тілах; E – випарник і конденсатор; PH – теплообмінник; C – конденсатор органічного робочого тіла;

CP – насос; CW – охолоджувальна вода; I – вхід відхідних газів; O – вихід відхідних газів;

вода в агрегатному стані рідини та пари циркулює в контурі 1-2-3-4-5-6-7-(8-9)-10, у дужках виділено точки, наявні лише у триконтурній схемі; перше органічне робоче тіло циркулює в контурі a-b-c-d-e, а друге – u-v-w-x-y

Параметри робочих тіл для триконтурної схеми

№	Тиск P, кПа	Температура T, К (перший рядок), °C (другий рядок)	Ступінь сухості x	Ентропія s, кДж/(кг·К)	Ентальпія i, кДж/кг	Витрата G, кг/с
Контур I. Робоче тіло – вода. Потужність турбіни 286,0 кВт						
1	3976	310,49 37,34	0	0,5352	-15766	1,24
2	3976	523,15 250	0,5	4,433	-13982	1,24
3	3976	523,15 250	0	2,794	-14840	0,62
4	3976	523,15 250	1	6,073	-13124	0,62
5	150	384,55 111,4	0,8751	6,502	-13510	0,62
6	150	384,55 111,4	0,4167	3,847	-14530	0,62
7	150	309,72 36,57	0	0,5262	-15772	0,62
8	3976	405,35 132,2	0	1,654	-15367	0,62
9	3976	309,62 36,47	0	0,5235	-15769	0,62
10	150	310,08 36,93	0	0,531	-15770	1,24
Контур II. Органічне робоче тіло R152a. Потужність турбіни 161,8 кВт						
a	3500	379,35 106,2	1	2,642	-7199	4,63
b	675	302,48 29,33	0,9745	2,682	-7236	4,63
c	675	302,47 29,32	0	1,788	-7507	4,63
d	3500	304,85 31,7	0	1,791	-7502	4,63
e	3500	373,95 100,8	0	2,276	-7336	4,63
Контур III. Органічне робоче тіло R601a. Потужність турбіни 70,1 кВт						
u	5000	133,15 160,0	1	2,789	-7128	1,55
v	675	341,41 68,26	1	2,845	-7184	1,55
w	675	302,45 29,30	0	1,788	-7507	1,55
x	5000	306,04 32,89	0	1,792	-7500	1,55
y	5000	377,55 104,40	0	2,26	-7339	1,55

Параметри робочих тіл для двоконтурної схеми

№	Тиск P, кПа	Температура T, К (перший рядок), °С (другий рядок)	Ступінь сухості x	Ентропія s, кДж/(кг·К)	Ентальпія i, кДж/кг	Витрата G, кг/с
Контур I. Робоче тіло – вода. Потужність турбіни 286,0 кВт						
1	3976	312,39 39,24	0	0,5605	-15758	1,24
2	3976	523,15 250	0,5	4,433	-13982	1,24
3	3976	523,15 250	0	2,794	-14840	0,62
4	3976	523,15 250	1	6,073	-13124	0,62
5	150	384,55 111,4	0,8751	6,502	-13510	0,62
5a	150	384,55 111,4	0,5765	4,773	-14170	1,24
6	150	384,55 111,4	0,2547	2,909	-14891	1,24
7	150	311,95 38,8	0	0,5564	-15763	1,24
10	150	311,95 38,8	0	0,5564	-15763	1,24
Контур II. Органічне робоче тіло R152a. Потужність турбіни 227,1 кВт						
a	3500	379,35 106,2	1	2,642	-7199	6,5
b	675	302,48 29,33	0,9745	2,682	-7236	6,5
c	675	302,47 29,32	0	1,788	-7507	6,5
d	3500	304,83 31,68	0	1,791	-7502	6,5
e	35000	373,95 100,8	0	2,276	-7336	6,5

9. Marchesi R. Experimental analysis of radiators' thermal output for heat accounting / Marchesi R., Rinaldi F., Tarini C., Arpino F., Cortellessa G., Dell'isola M., Ficco G. // Thermal Science. – 2019. – Vol. 23. – № 2B. – P. 989-1002. <https://doi.org/10.2298/TSCI170301168M>

10. Редько А. О. Застосування абсорбційного теплового насоса в умовах наявної теплоелектроцентралі / А. О. Редько, І. О. Редько, С. В. Павловський, Ю. О. Бурда, Ю. О. Півненко, С. О. Алфьоров // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. – 2020 – Вип. 34. – С. 57-62, <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2020.34.57-62>

11. Яковлев, Б. В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения / Б. В. Яковлев. – Москва: Новости теплоснабжения, 2008. – 447 с.

12. Panferov V.I. On the optimal control of the coolant temperature in heat networks / Panferov V.I., Gavey O.F. // Computer technology, management, electronics. – 2014. – № 4. – P. 65-70.

13. Череднік А. Д. Моделювання та оптимізація систем променевого опалення за критерієм мінімуму виробництва ентропії / А. Д. Череднік, Ю. О. Бурда, Ю. О. Півненко І. О. Редько // Науковий вісник будівництва. – 2020. – Т. 3. – № 101. – С. 190-197.

14. Кролин А. Эффективное теплоснабжение: датский опыт [Электронный ресурс] / А. Кролин // ЭнергоРынок. – 2005. – № 4. – Режим доступа: http://www.e.m.ru/er/2005_04/22708/

15. Lund H. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems / H. Lunda, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund, B. V. Mathiesen // Energy. – 2014. – Vol. 68. – P. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>

16. Гашо Е.Г. О некоторых способах повышения эффективности теплоснабжения: регулирование или автономное отопление? / Е.Г. Гашо, С. А. Козлов, В.П. Кожевников // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 2. – С. 17-22.

17. Loppenhien J.K. Temperature Optimization – Horning District Heating Company has achieved remarkable results / J.K. Loppenhien, P. Jensen // Holtcool. – 2008. – №1. – pp. 14-15

18. Kaganovich B. M. Equilibrium thermodynamic modeling of dissipative macroscopic systems / Kaganovich B.

M., Keiko A.V., Shamansky V.A. // *Advances in Chemical Engineering*. – Vol. 39. – No.C. – 2010. – P.1-74. DOI: [10.1016/S0065-2377\(10\)39001-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2377(10)39001-6)

19. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов. 9-е изд., стереот. – Москва: Издательство МЭИ, 2009. – 472 с.

20. Редько А. А. Энтропийный анализ процессов сжигания газа в топке водотрубного котла со вторичным излучателем / А. А. Редько, И. А. Редько, Ю. А. Бурда, С. В. Павловский, А. Ф. Редько, А. В. Давиденко // *Инженерно-физический журнал*. – 2021. – Т. 94. – № 1. – С. 219-226.

References

1. Redko I., Ujma A., Redko A., Pavlovskiy S., Redko O., Burda Yu. “Energy efficiency of buildings in the cities of Ukraine under the conditions of sustainable development of centralized heat supply systems”. *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 247, 110947 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110947>

2. Sharapov V.I., Rotov P.V. “Regulirovanie nagruzki sistem teplosnabzheniia”. *Novosti teplosnabzheniia*, 2007.

3. Redko A., Dzhyoiev R., Davidenko A., Pavlovskaya A., Pavlovskiy S., Redko I., Kulikova N., Redko O. “Aerodynamic Processes and Heat Exchange in the Furnace of a Steam Boiler with a Secondary Emitter”. *Alexandria Engineering Journal*. 2019. Vol. 58, Iss. 1. P. 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.12.006>.

4. Kuvshinov Yu.Y., Samarin O.D. *Osnovy obespecheniia mikroklimata zdanii*. Izdatelstvo ASV, 2012.

5. Samarin O.D. *Teplofizika. Energoberezhnie. Energoeffektivnost*. Izdatelstvo ASV, 2014.

6. Redko A., Kulikova N., Redko O., Pavlovskiy S. “Simulation and optimization of heat-exchanger parameters of heat pipes by changes of entropy”. *Heat Transfer Research*. 2018. Vol. 49. Iss. 16. P. 1545-1557. DOI: 10.1615/Heat-TransRes.2018019336

7. Sednin V.A., Sednin A.V., Bogdanovich M.L. Optimizatsiia parametrov temperaturnogo grafika otpuska teploty v teplofikatsionnykh sistemakh. *Energetika. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh obiedinenii SNG*. 2009. №4. P. 55-62.

8. Doroshenko J.F., Kovalchuk G.I., Potapov M.D. “O tselesoobraznosti ispolzovaniia ponizhennogo grafika raboty tsst munitsipalnykh sistem teplosnabzheniia.” *Informatsiini tekhnologii: nauka, tekhnika, tehnologii, osvita, zdorovia: tezy dopovidei HXV mizhnarodnoi naukovo-praktichnoi konferentsii MicroCAD-2017, 17-19 travnia 2017 r.: u 4 ch. Ch. III. Kharkiv: NTU «HPI»*. p. 24. http://pim.net.ua/arch_f/tez_mic_17_III.pdf

9. Marchesi R., Rinaldi F., Tarini C., Arpino F. “Cortellessa G. M. Dell’isola G. Ficco Experimental analysis of radiators’ thermal output for heat accounting”. *Thermal Science*. 2019. Vol. 23. № 2B. P. 989-1002. <https://doi.org/10.2298/TSCI170301168M>

10. Redko A. O., Redko I. O., Pavlovskiy S. V., Burda Yu. O., Pivnenko Yu. O., Alferov S. O. “Zastosuvannia absorbttsiinogo teplovogo nasosa v umovakh naiavnoi teploelektrotsentrali”. *Ventilyatsiia, osvItlennia ta teplogazopostachannia: nauk.-tekhn. zb.* 2020. Vyp. 34. P. 57-62, <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2020.34.57-62>

11. Yakovlev B.V. *Povyshenie effektivnosti sistem teplofikatsii i teplosnabzheniia*. *Novosti teplosnabzheniia*, 2008.

12. Panferov V.I., Gavay O.F. “On the optimal control of the coolant temperature in heat networks”. *Computer technology, management, electronics*. 2014. No 4. P. 65-70.

13. Cherednik A. D., Burda Yu. O., Pivnenko Yu. O. Redko I. O. “Modeliuvannia ta optimizatsiia system promenevoho opalennia za kriteriem minimumu vyrobnytstva entropii”. *Naukoviy visnik budIvnytstva*. 2020. T. 3. № 101. – P. 190-197.

14. Krolin A. “Effektivnoe teplosnabzhenie: datskii opyt”. *EnergoRynok*. 2005. № 4. <http://www.e m.ru/er/2005 04/22708/>

15. Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsene J. E., Hvelplunda F., Mathiesen B.V. “4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems”. *Energy*. 2014. Vol. 68. P. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>

16. Gasho E. G., Kozlov S. A., Kozhevnikov V. P/. “O nekotorykh sposobah povyisheniya effektivnosti teplosnabzheniia: regulirovanie ili avtonomnoe otoplenie?” *Novosti teplosnabzheniia*. 2007. № 2. P. 17-22.

17. Loppenhien J.K., Jensen P. “Temperature Optimization – Horning District Heatind Company has achieved remarkable results”. *Holtcool*. 2008. №1. P. 14-15.

18. Kaganovich B. M., Keiko A. V., Shamansky V. A. “Equilibrium thermodynamic modeling of dissipative macroscopic systems”. *Advances in Chemical Engineering*. Vol. 39. No.C. 2010. P. 1-74. DOI: [10.1016/S0065-2377\(10\)39001-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2377(10)39001-6)

19. Sokolov E. Ya. *Teplofikatsiia i teplovyie seti: Uchebnik dlia vuzov. 9-e izd., stereot*. Izdatelstvo MEI, 2009.

20. Редько А. А., Редько И. А., Бурда Ю.А., Павловский С. В., Редько А. Ф., Давиденко А. В. “Entropiinyi analiz protsessov szhiganiia gaza v topke vodotrubnogo kotla so vtorychnym izluchatelem”. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2021. T. 94. № 1. С. 219-226.

УДК 621.18-182.2

Численное моделирование параметров тепловой схемы системы утилизации отходящего тепла

Ю. А. Бурда¹, Ю. А. Пивненко², И. О. Редько³, А. Д. Чередник⁴, А. В. Приймак⁵

¹ к.т.н., ассистент, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, burda.yurii.1991@gmail.com, ORCID 0000-0003-3470-1334

² к.т.н., ассистент, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, Pivnenko.Yura@gmail.com, ORCID 0000-0002-6675-2649

³ д.т.н., профессор, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, г. Харьков, Украина, Germes_s2006@ukr.net, ORCID: 0000-0002-9863-4487

⁴ к.т.н., доцент, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, artemcherednic@gmail.com ORCID 0000-0002-3385-0584

⁵ д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, 02opriymak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9515-9879

Аннотация. Гибридные энергетические установки впервые предложены при разработке геотермальных месторождений Камчатки в 1964-66 годах. Установка состоит из двух контуров, в которых используется турбина на водяном паре с температурой до 473,15 К (200 °С) и степенью сухости 5 % и турбина на хладоне R12 мощностью 5 МВт. Электрическая мощность составляет 12 МВт. Гибридные энергетические установки также используются в металлургии, цементной и стеклянной отраслях промышленности, где используется теплота уходящих газов с температурой до 623,15 К (350 °С). Особенностью проектных расчётов является неопределённость конфигурации в течение будущего срока эксплуатации части исходных данных, в том числе удельных стоимостных характеристик. Увеличение количества элементов схем и возможных комбинаций их соединений, расширение диапазонов изменений начальных данных, факторы системности и неопределённости значительно затрудняют выбор окончательного варианта тепловой схемы. Расчётные исследования показали целесообразность использования двухконтурной схемы с увеличенным расходом органического рабочего тела по сравнению с трёхконтурной. Это незначительно уменьшает мощность, однако существенно упрощает и удешевляет систему.

Ключевые слова: численное моделирование, системы утилизации уходящего тепла, ГеоТЭС, гибридные энергетические установки.

UDC 621.18-182.2

Numerical simulation of parameters of the thermal scheme of the waste heat recovery system

Y. Burda¹, Y. Pivnenko², I. Redko³, A. Cherednik⁴, O. Priymak⁵

¹ Ph.D assistant, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, urda.yurii.1991@gmail.com, ORCID 0000-0003-3470-1334

² Ph.D assistant, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, Pivnenko.Yura@gmail.com, ORCID 0000-0002-6675-2649

³ Doctor of technical sciences, prof. Ukrainian state university of railway transport, Ukraine, ihor.redko1972@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2331-7273

⁴ Ph.D, assistant, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, artemcherednic@gmail.com ORCID 0000-0002-3385-0584

⁵ Dr. Hab., prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, 02opriymak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9515-9879

Abstract. Hybrid power plants were first proposed in the development of geothermal deposits in Kamchatka in 1964-66. The unit consists of two circuits, which use a steam turbine with a temperature of up to 200 °C, with a degree of dryness of water vapor is 5% and a turbine on R12 refrigerant with a capacity of 5 MW. Electric power is 12 MW. Hybrid power plants are also used in metallurgy, cement and glass industries where the heat of exhaust gases with temperatures up to 350 °C is used. A feature of the design calculations is the uncertainty of changes during the future life of some of the initial data, in particular, specific cost indicators. The available experience and the analysis of approaches to development of flowing parts of turbines have shown that depending on degree of expansion and expenses of working bodies the corresponding type of flowing part is chosen. The calculated studies of the three-circuit thermal circuit (at a discharge temperature of 350 °C) showed that increasing the parameters of the working fluids is not always rational. Increasing the heat drop on the turbine leads to an increase in the number of turbine stages, but the cost of the working fluid is not enough to abandon the partial drive. The one-dimensional calculation does not show a complete picture of the flow in the flowing part of the turbine, which will have large losses from secondary flows and flows of the working fluid due to the low height of the blades and a high degree of partiality. The results also allow us to conclude that the most appropriate is the implementation of a double-circuit thermal scheme and increase the consumption of working fluids. Increasing the number of circuit elements and possible combinations of their connections, expanding the range of changes in the initial data, factors of systemicity and uncertainty significantly complicate the choice of the final version of the thermal circuit.

Keywords: numerical simulation, source heat recovery systems, hybrid power plant, waste heat recovery system.

Надійшла до редакції / Received 12.04.2021