УДК 621.165

В. В. Мартиненко
Д. В. Степанов

УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОТИ ДИМОВИХ ГАЗІВ КОТЛА БКЗ-75-39ФБ В ОРГАНІЧНОМУ ЦИКЛІ РЕНКІНА

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Оцінено потенціал утилізації теплоти димових газів котла БКЗ-75-39ФБ в органічному циклі Ренкіна (ORC). Охолодженню газів зі 180 до 160°С відповідають 683,7кВт теплової та 95,7кВт електричної потужності за прийнятого ККД 14%. За кислотної точки роси 142,76°С і запасу 20 °С цей режим не задовольняє вимогу до мінімальної температури стінки. Оцінено вплив глибини охолодження на розрахункову потужність ORC.

Ключові слова: органічний цикл Ренкіна, БКЗ-75-39ФБ, димові гази, утилізація теплоти, кислотна точка роси.

Abstract

The potential for recovering flue gas heat from a BKZ-75-39FB boiler using an organic Rankine cycle (ORC) was assessed. Cooling the gas from 180 to 160 °C gives a calculated thermal power of 683.7 kW and an electrical output of 95.7 kW at an assumed efficiency of 14 %. With an acid dew point of 142.76 °C and a 20 °C margin, this outlet temperature fails the minimum wall temperature criterion. The effect of the outlet temperature on ORC output is estimated.

Keywords: organic Rankine cycle, BKZ-75-39FB boiler, flue gas, heat recovery, acid dew point.

Вступ. Постановка задачі

В органічному циклі Ренкіна (ORC) на електроенергію перетворюють частину теплоти від згоряння біомаси або від нагрітих технологічних потоків [1]. У системах із градирнями теплоту можна відбирати від оборотної води перед охолодженням [2]. У парових котельнях джерелом може бути надлишкова пара [3] або вода безперервної продувки[4], у водогрійних димові гази після поверхонь нагріву[5]. У сонячних установках теплоту підводять від теплоносія колекторів; тривалість роботи залежить від опромінення та наявності акумулятора[6]. Для гарячого скидного конденсату спочатку перевіряють можливість його повернення в паровий контур[7].

Для вугільного котла доступна теплова потужність залежить від витрати газів і допустимої глибини їх охолодження.

Мета роботи – оцінити потенціал відхідних газів котла БКЗ-75-39ФБ і визначити, як обмеження за кислотною точкою роси впливає на розрахункову потужність ORC.

Результати дослідження

Утилізатор пропонується розмістити в газоході після економайзера й повітропідігрівника котла. Випарник ORC отримує теплоту через проміжний контур. Для стаціонарного режиму прийнято паровидатність 21,11 кг/с, температуру перегрітої пари 445 °С і живильної води 145°С [8]. Для вугілля марки Г класу Р розрахункова нижча теплота згоряння становить 21,77 МДж/кг, вміст сірки на робочу масу – 2,6%. Температуру газів перед утилізатором задано 180°С.

За тепловим балансом корисна теплова потужність котла становить 57,27 МВт, ККД – 90,62%, витрата палива – 2,90 кг/с. За коефіцієнта надлишку повітря 1,38 питомий об’єм вологих газів за нормальних умов становить 8,455 м³/кг палива, їх об’ємна витрата за тих самих умов – 24,52 м³/с, а об’ємна частка водяної пари – 7,84 %. Теплову та розрахункову електричну потужності визначено за залежностями

$$Q_u = m\left[I_г(t_1) - I_г(t_2)\right], \quad P_{el} = \eta_{ORC} Q_u, \tag{1}$$

де м – витрата палива, кг/с; $I_г$ – ентальпія газів на 1 кг палива, кДж/кг; t_1 і t_2 – температури газів до і після утилізатора; η_{ORC} – заданий ККД циклу в частках одиниці.

Для охолодження зі 180 до 160 °С тепловий потенціал становить 683,7 кВт. За заданого ККД ORC 14 % цьому відповідає 95,7 кВт електричної потужності; діапазон ККД 8 – 16% дає 54,7 – 109,4 кВт за того самого відбору теплоти.

Кислотна точка роси за приведеним вмістом сірки й золи становить 125,16 °С. За кореляцією Вергоффа – Банчеро[9] і прийнятої частки перетворення сірки у SO_3 1% одержано 142,76°С. Зміна цієї частки від 0,5 до 2% дає 135,64 – 150,14 °С. Для попередньої оцінки використано 142,76°С. Умова для неконденсаційного утилізатора з температурним запасом має виконуватися в найхолоднішій точці газової поверхні стінки:

$$t_{мін} \geq t_к + \Delta t_з, \quad (2)$$

де $t_{мін}$ – мінімальна температура стінки з боку газів; $t_к$ – кислотна точка роси; $\Delta t_з$ – прийнятий температурний запас 20 °С.

Отже, стінка має бути не холоднішою за 162,76 °С. Під час відбору теплоти стінка холодніша за гази в тому самому перерізі, тому охолодження до 160 °С несумісне з прийнятим запасом, а 95,7 кВт характеризує розрахунковий потенціал цього сценарію.

Для оцінки чутливості (табл. 1) за незмінної витрати газів прийнято лінійну залежність ентальпії від температури в інтервалі 160–180°С. Зміна температури газів після утилізатора на 1°С відповідає приблизно 34,2 кВт теплової та 4,79 кВт електричної потужності за прийнятого ККД 14%.

Таблиця 1 – Вплив температури газів після утилізатора на розрахункову потужність

Температура газів на виході, °С	**Тепловий потенціал, кВт**	**Потужність ORC за ККД 14 %, кВт**	**Граничний перепад між газом і стінкою на виході, °С**
160	683,7	95,7	−2,76
165	512,8	71,8	2,24
170	341,9	47,9	7,24
175	170,9	23,9	12,24

Граничний перепад у таблиці це різниця між температурою газів на виході 162,76°С. За 170°С оцінка 47,9 кВт відповідає режиму, для якого перепад на виході не може перевищувати 7,24 °С, а температура всієї газової поверхні має бути не нижчою за 162,76 °С. За умовної рівності температур газів і стінки на виході при 162,76°С верхня оцінка потужності за тієї самої витрати й ККД становить 82,5 кВт.

За 6000 год/рік і розрахункового тарифу 10,8 грн/(кВт·год) сценарій 180 – 160°С дає 574,3 МВт·год/рік та 6,20 млн грн/рік валової економії за повного заміщення купованої електроенергії. Для умовного режиму 180 – 170°С ці показники становлять приблизно 287 МВт·год/рік і 3,1 млн грн/рік.

Для сценарію 180 – 160 °С за питомих капіталовкладень 1410 – 6000 євро/кВт і розрахункового курсу 51,77 грн/євро простий строк окупності за валовою економією становить 1,13 – 4,79 року. Для оцінки окупності проєкту потрібні фактичний графік навантаження, повний кошторис, витрати на обслуговування та електроспоживання насосів, системи охолодження й димососа.

Висновки

Для котла БКЗ-75-39ФБ теплота відхідних газів може бути джерелом енергії для ORC. Охолодження зі 180 до 160 °С дає розрахункові 95,7 кВт електричної потужності, але не забезпечує прийнятий запас до кислотної точки роси, проте виникає можлива економія за рахунок заміщення покупної електроенергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems / S. Quoilin [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2013. - Vol. 22. - P. 168-186. - DOI: 10.1016/j.rser.2013.01.028.

2. Зайцева Л. В. Застосування низькотемпературних електрогенераторів на «зайвому» теплі теплогенеруючого обладнання [Електронний ресурс] / Л. В. Зайцева, І. В. Тюпа // Приладобудування: стан і перспективи : зб. матеріалів XXIV Міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 13-14 травня 2025 р.). - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. - С. 363-365. - URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/75910 (дата звернення: 16.11.2026).

3. Sung T. An organic Rankine cycle for two different heat sources: Steam and hot water / T. Sung, K. C. Kim // Energy Procedia. - 2017. - Vol. 129. - P. 883-890. - DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.251.

4. Waste heat harvesting from continuous blowdown for power generation via organic Rankine cycle network: Case study of a coal-fired power plant / N. P. Chaimongkol [et al.] // Results in Engineering. - 2023. - Vol. 20. - Art. 101543. - DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101543.

5. Утилізація теплоти димових газів котельні шляхом використання органічного циклу Ренкіна / О. Л. Шубенко, В. А. Маляренко, О. В. Сенецький, М. Ю. Бабак // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. - 2018. - № 11. - С. 4-11. - DOI: 10.20998/2078-774X.2018.11.01.

6. Solar-powered organic Rankine cycles: a technical and historical review / R. Dickes [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2025. - Vol. 212. - Art. 115319. - DOI: 10.1016/j.rser.2024.115319.

7. Return Condensate to the Boiler [Electronic resource] / U.S. Department of Energy. - 2012. - (Energy Tips: Steam ; Steam Tip Sheet No. 8). - URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/steam8_boiler.pdf (дата звернення: 16.11.2026).

8. Чепурний М. М. Теплові розрахунки парогенераторів : навч. посіб. / М. М. Чепурний, Д. В. Степанов, Є. С. Корженко. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 155 с. – URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Chepurniy_2005_155.pdf (дата звернення: 16.11.2026).

9. Comparison and Analysis of Calculation Methods for Acid Dew Point of Coal-Fired Boiler Flue Gas Based on SO_3 Concentration / M. Zhang [et al.] // Applied Mathematics, Modeling and Computer Simulation : Proceedings of AMMCS 2021. – 2022. – P. 979–989. – DOI: 10.3233/ATDE220102.

Мартиненко Віталій Вікторович, студент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e – mail: vitaliimartynenko2004@gmail.com

Степанов Дмитро Вікторович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Martynenko Vitalii, student, Department of Heat Power Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e – mail: vitaliimartynenko2004@gmail.com

Stepanov Dmytro, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Heat Power Engineering, Vinnytsia National Technical University.