

УДК 621.036.7

Л. О. КЕСОВА, д-р техн. наук; проф. НТУУ «КПІ», Київ;
Т. В. ШЕЛЕШЕЙ, аспірант НТУУ «КПІ», Київ;
К. А. ДРОГАЛЬЧУК, магістр НТУУ «КПІ», Київ

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА ДИМОВИХ ГАЗІВ КОТЛІВ МАНЕВРОВИХ ЕНЕРГОБЛОКІВ ТЕС

Розглядаються вирішення питань надійної та економічної роботи обладнання теплових електростанцій шляхом використання «малозатратних» технологій утилізації теплоти відхідних газів. Приведені принципові схеми реалізації даної технології. Проаналізовано економічний та екологічний ефект від впровадження різних технологій утилізації тепла відхідних газів. Технологія БПЕ («Блоки підвищеної ефективності») сприяє: підвищенню ККД котла; отриманню виробітки додаткової електричної енергії на тепловому споживанні; заміні пікової резервної потужності в енергосистемі за рахунок збільшення конденсаційної виробітки електроенергії на ТЕС; зменшенню викидів в навколишнє середовище; підвищенню ККД електрофільтрів.

Ключові слова: димові гази, відхідні гази, утилізація, маневрові енергоблоки ТЕС, «Блоки підвищеної ефективності», турбінний економайзер.

Вступ

Сьогодні в Україні особливо актуальною задачею є вирішення проблеми надійної та економічної роботи обладнання теплових електростанцій (ТЕС), яке фізично й морально застаріло та потребує модернізації, реконструкції чи повної заміни [1, 2]. Однак для забезпечення стійкості енергосистеми важливим є збереження працездатності та безпеки діючих ТЕС і можливість отримання на них додаткової пікової потужності без зниження експлуатаційної економічності.

Мета статті

Для цього на діючих і нових енергоблоках, необхідно провести сумісну оптимізацію хвостових поверхонь котлів і схеми регенеративного підігріву живильної води, що включає оптимізацію температури живильної води і відхідних газів, та підвищити рівень очистки димових газів в електрофільтрах (зниження температури газів підвищує ККД електрофільтрів) [3, 4].

Аналіз основних досягнень і літератури

Безпечна та економічна експлуатація сучасних ТЕС залежить від надійної роботи всього комплексу основного і допоміжного обладнання [5, 6]. Ефективним шляхом вирішення цієї задачі є утилізація теплоти відхідних газів котлів. Дійсно, теплота відхідних газів може використовуватися як в котлі (рециркуляція їх «високотемпературної» частини з РПП (регенеративний повітрепідігрівач) в топку; підігрів холодного повітря перед РПП), так і для зовнішнього споживача теплоти. Підігріте повітря з повітряного каналу димової труби можна направляти в короб підведення його до калорифера (К) (використання теплоти підігрітого в калорифері повітря зменшує витрату гріючого теплоносія і підвищується надійність роботи димової труби) [7, 8]. Перспективним напрямком зростання коефіцієнта використання тепла є термохімічна регенерація, сутність якої полягає у використанні тепла димових газів для попередньої ендотермічної переробки вихідного палива. В результаті цього воно отримує більший запас хімічно зв'язаної енергії – зростаючої теплоти згорання [9]. Всі ці заходи можна здійснити при модернізації обладнання ТЕС в період капітальних ремонтів.

© Л.О. Кесова, Т.В. Шелешей, К.А. Дрогальчук, 2014

Згідно з «Галузевою програмою розвитку теплових електростанцій та теплоелектроцентралей» України передбачається три рівні модернізації: «маловитратна», «середньовитратна», «високовитратна». Утилізацію тепла димових газів при реконструкції діючих ТЕС можна віднести до «маловитратної» модернізації. Економічна ефективність при здійсненні заходів за рівнями модернізації котлів наведені в табл. 1 [10].

Таблиця 1

Економічна ефективність заходів за рівнями модернізації котлів

Економічна ефективність	«Маловитратна»	«Середньовитратна»	«Високовитратна»
Подовження ресурсу блоку, років	10–15	15–20	20–30
Збільшення маневреності, %	15–20	20–30	20–50
Питомі капітальні витрати дол./кВт	100–200	250–700	700–1200
Підвищення ККД блоку, %	2–5	3–8	6–11

До «маловитратної» модернізації слід віднести і вирішення питань утилізації теплоти відхідних газів котлів шляхом установки теплообмінників в конвективній шахті для нагріву води на власні потреби та теплопостачання або підвищення електричної потужності енергоблоків за технологією – «Блоки підвищеної ефективності» (БПЕ), що запропонована та розроблена «Подільським машинобудівним заводом» та ЦКТІ (РФ) [11].

Технологія «БПЕ» реалізується шляхом встановлення в тракці відхідних газів котлів спеціальних теплообмінників (турбінного економайзера – ТуЕ, повітроводяного теплообмінника – ПВТО, вбудованого теплообмінника – СВТО), які включаються в байпаси системи регенерації турбін [12]. При цьому подача живильної води чи конденсату в котельний економайзер (ЕКО) здійснюється двома потоками: основним, (після підігріву в підігрівачах високого – ПВТ чи низького тиску – ПНТ) і байпасним, що відводиться з тракту живильної води перед регенеративними підігрівачами та поступає в турбінний економайзер. В ньому вода нагрівається за рахунок відбору тепла від відхідних газів і подається в ЕКО в суміш з основним потоком (рис. 1а,б). Для регулювання співвідношення витрат води в обох потоках на основному і байпасному трубопроводах встановлюються засувки (замість них на байпасі ПВТ для забезпечення швидкого переключення режимів доцільно встановлювати регулюючий клапан).

В останній час турбінний економайзер включається в нові теплові схеми [14].

Так, ВАТ «ЕМАльянс» виконано проектну розробку котла Пп-2050-25-570КТ для блока 660 МВт на суперкритичні параметри пари. Підігрів повітря здійснюється у винесеному трубчатому повітрепідігрівачі, у розтин якого встановлений спеціальний теплообмінник, призначений для зниження температури відхідних газів. По воді ТуЕ включається на байпас підігрівача низького тиску. В проекті пилувугільного котла Пп-1000-24,5-565КТ ВАТ «ЕМАльянс» енергоблоку з турбіною 330 МВт в якості додаткового способу зниження температури відхідних газів також планується установка турбінного економайзера. Розрахунковий ККД котла бруто 92,5 %, за

рахунок установки ТуЕ можливо збільшити до 94,0 %; регенерація парової турбіни байпасується частково [14].

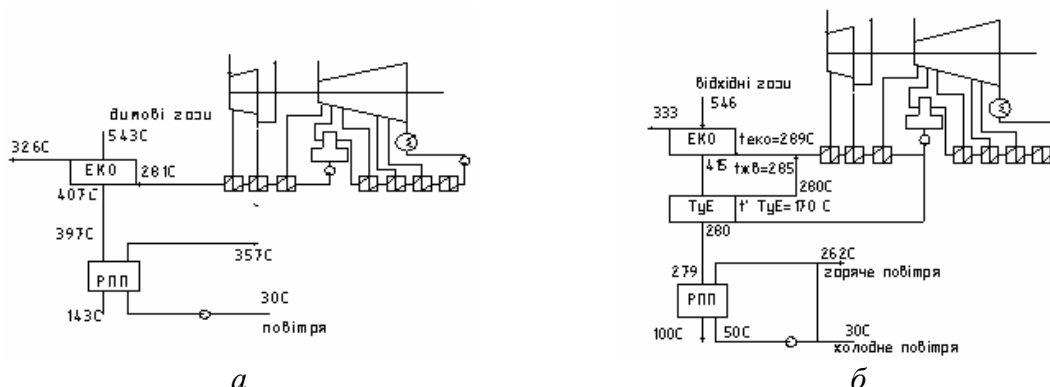


Рис. 1 – Принципові схеми включення турбінного економайзера в теплову схему турбіни [13]:
а – базовий варіант; б – варіант модернізації

Технологія БПЕ вже впроваджена на деяких електростанціях світу, але в Україні її ще немає. Електростанції, де використана технологія БПЕ, наведені в табл. 2 [11].

Таблиця 2

Електростанції, що переведені на технологію БПЕ

Електростанція	Країна	Продуктивність котла т/год
Березівська ДРЕС-1	РФ	2650
Екібастузька ДРЕС-2	Казахстан	1650
Південно-казахстанська ДРЕС-2	Казахстан	1650
Мордовська ДРЕС	РФ	1650
Карагандинська ДРЕС-2	Казахстан	220
Південно-Уральська ДРЕС	РФ	220
ТЕС Боксберг	Німеччина	640
Томь-Усинська ДРЕС	РФ	640
ТЕЦ-21 Мосенерго	РФ	1000
Рефтинська ДРЕС	РФ	1650
Березівська ДРЕС-2	РФ	2650
Зайнська ДРЕС	РФ	640
ТЕЦ Шаньхе	Китай	500
ТЕС Імін	Китай	1650
ТЕС Цзисянь	Китай	1650
Каширська ДРЕС	РФ	1000
ТЕЦ-3 Улан-Батор	Монголія	220
Цзиньменська ТЕС	Китай	1000
Троїцька ДРЕС	РФ	1050
ТЕС Кераціні	Греція	640
ТЕС Скавіна	Польща	210
ТЕС Сисак	Хорватія	660
ТЕС Гацко	Чорногорія	1000
ТЕС Бітола	Македонія	670
Новоангрєнська ДРЕС	Узбекистан	1000
Єрмаковська ДРЕС	Казахстан	1070

Значний ефект було досягнуто і при використанні СВТО, які включені у конденсатний тракт теплової схеми енергоблоку 300 МВт ТЕС «Гацко» (Боснія і Герцеговина). СВТО (12 пакетів) включається по повітрю між другим і третім ходами трубчатого повітропідігрівача – ТПП; а по основному конденсату – в байпас підігрівачів низького тиску ПНТ-3 та ПНТ-4 системи регенеративного підігріву блоку. Для регулювання співвідношення витрат конденсату через СВТО і ПНТ на лінії конденсату за ПНТ-4 встановлений регулюючий клапан, а на трубопроводі подачі конденсату до СВТО і трубопроводі конденсату після ПНТ-4 – зворотні клапани. В результаті впровадження технології на ТЕС «Гацко» було досягнуто: зниження температури димових газів за котлом на 30 °С; тепло, що знімається в СВТО, складає – (113–121,5) ГДж/год; додаткова потужність блоку – (5,8–6,4) МВт (в залежності від виду палива); економічність блоку підвищилася на 0,6 % [15]. Схема включення СВТО зображена на рис. 2.

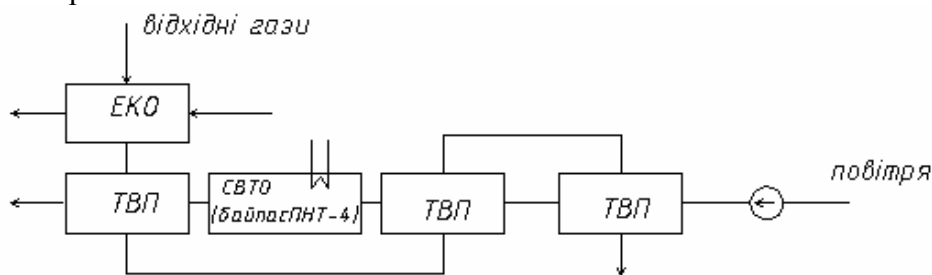


Рис. 2 – Схема включення вбудованого теплообмінника – СВТО

Аналіз переваг технологій утилізації тепла димових газів, що використана при модернізації енергоблоків ТЕС, показав [11]:

- підвищення ККД котла за рахунок зниження температури відхідних газів і більш повного використання теплоти палива (зниження q_2);
- додаткове вироблення електричної енергії на тепловому споживанні за рахунок пари відборів, що «витіснені»;
- заміна пікової резервної потужності в енергосистемі за рахунок збільшення конденсаційного виробітку електроенергії на ТЕС;
- зменшення екологічних викидів в навколишнє середовище;
- підвищення ККД електрофільтрів за рахунок зниження температури димових газів.

Однак дослідження показали, що організація роботи блоків, включає комплекс ряду заходів [16]:

- 1) часткове байпасування групи ПВТ без зменшення номінальної продуктивності котла і номінальної витрати свіжої пари на турбіну;
- 2) підвищення теплопродуктивності енергетичного котла відносно номінальної (за рахунок зниження температури газів, що відходять).

При цьому збільшення виробітку електричної та теплової потужності енергоустановки при БПЕ дає не тільки економію палива, а і значне підвищення довговічності ПВТ (завдяки зменшенню швидкості живильної води).

Енергетична ефективність даного способу «маловитратної» модернізації залежить від типу енергоустановки (конденсаційна, теплофікаційна) та виду палива (мазут, вугілля, природний газ), що попередньо визначає мінімально допустиму температуру відхідних газів з умов можливої корозії хвостових поверхонь нагріву котла («точка роси») та від відносної частини витрати живильної води, яка байпасує ПВТ.

Аналіз показав, що байпасування ПВТ призводить до зниження температури регенеративного підігріву живильної води, що зменшує ККД паросилового циклу КЕС і питоме вироблення електроенергії на тепловому споживанні на ТЕЦ. Однак інші показники теплової економічності енергоустановок покращуються: збільшується ККД котлів (завдяки зниженню температури газів, що відходять); в умовах ТЕЦ – збільшується об’єм комбінованого виробництва енергії з відповідною економією палива в енергосистемі (додаткова електроенергія в опалювальний період може бути вироблена без термодинамічних втрат) [16].

Таким чином, створення «Блоків підвищеної ефективності» – це принципова можливість отримання додаткової електричної та теплової енергії, вартість якої значно менша питомих капіталовкладень у порівнянні з будівництвом нових потужностей.

Слід відмітити, що найбільший енергетичний ефект від модернізації діючого обладнання по схемі БПЕ був досягнутий на газомазутних енергоблоках при спалюванні газу (за рахунок підвищення теплопродуктивності котлів та глибини допустимого зниження температури димових газів). В [17] показано, що при переході котла на спалювання газу, маємо можливість: можна збільшити потужність енергоблоків на 5 % без підвищення паропроодуктивності котла за рахунок «шунтування» потоків води і пари в деяких поверхнях нагріву і зниження гідравлічного опору в тракці; та забезпечити відбір від котла теплофікаційного тепла шляхом встановлення високотемпературного теплофікаційного економайзера (ВТЕ). Схеми модернізації хвостових поверхонь нагріву котла в порівнянні з базовою компоновкою наведено на рис. 3, де *а* – базовий варіант (має високу температуру відхідних газів); *б* – варіант з встановленням ВТЕ для забезпечення потреби в теплі; *в* – варіант встановлення за ЕКО 2-х турбінних економайзерів, один з яких – ТуЕ_{ВТ} працює на байпасі ПВТ, другий – ТуЕ_{НТ} – на байпасі ПНТ; регенеративний повітропідігрівач – РПП замінюється двооходовим трубчастим – ТПП [17].

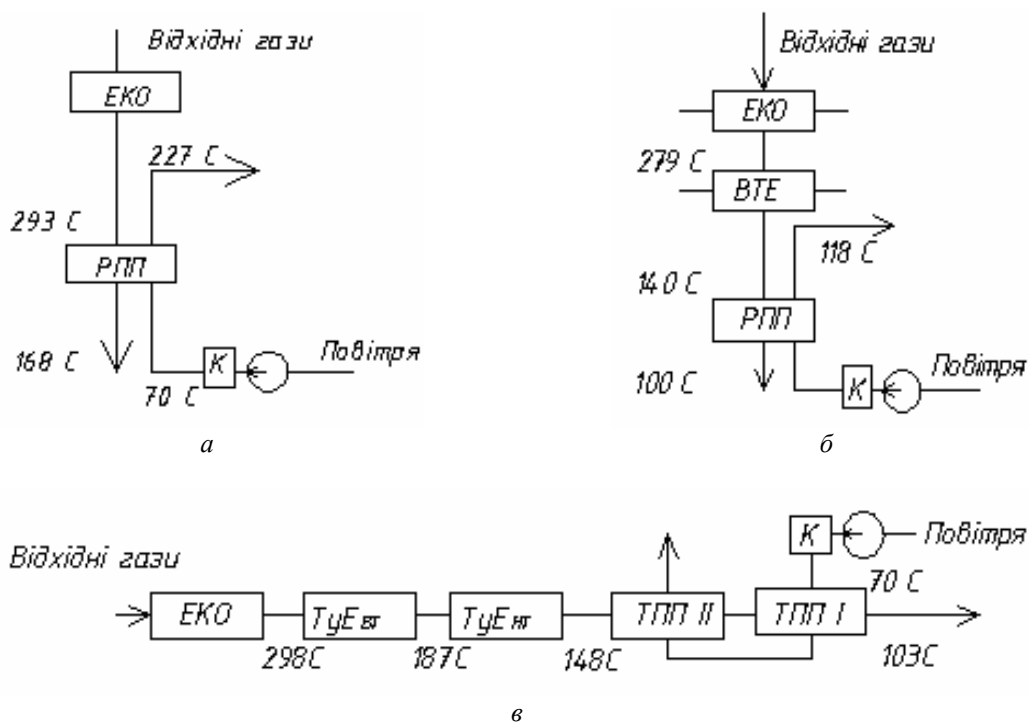


Рис. 3 – Варіанти схем компоновки хвостових поверхонь нагріву котла

В роботі [13] досліджено, що при розглянутих варіантах модернізації енергоблоків приріст електричної потужності досягає 11,4 МВт; зниження питомих витрат палива на виробництво електроенергії складає до 4,85 %; приріст теплопродуктивності блока – 201 ГДж/год, вартість обладнання для модернізації досягає (1,5–9,6) млрд. рублів. За даними досліджень і розрахунків ВАТ «Подільський машинобудівний завод» та ЦКТІ встановлено, що для «Блоків підвищеної ефективності» весь комплект заводського обладнання з урахуванням його монтажу може бути оцінений приблизно в 2,1 млн. дол., а послуги заводів – приблизно 0,7 млн. дол. Дані розрахунків показали, що «безпаливну» додаткову потужність можна отримати і при зменшенні паропроодуктивності котла до 934,3 т/год. При цьому додаткова потужність складає 4,7 МВт, а її вартість – 595 дол./кВт.

За результатами досліджень перевід пиловугільного енергоблоку з турбіною типу Т-250-240 на схему БПЕ забезпечує в конденсаційному режимі приріст електричної потужності 19,6 МВт, в теплофікаційному режимі – 11,9 МВт. При цьому зниження питомих витрат палива для виробництва електроенергії в конденсаційному режимі складає приблизно 1 %, в теплофікаційному – 17,2 %; температура відхідних газів зменшується на 37 °С (з 167 °С до 130 °С); температура дуттєвого повітря зберігається незмінною, що важливо для високореакційного вугілля. В роботі [3] досліджено, що одночасно з економічним при використанні технології БПЕ досягається і екологічний ефект: в пиловугільних котлах в 2–3 рази знижуються викиди золи із електрофільтрів (за рахунок глибокого охолодження димових газів), в газомазутних котлах – на (20–30) % зменшуються викиди оксидів азоту (внаслідок зниження температури дуттєвого повітря). Таким чином, розрахунки та дослідження показали, що показники отримані в процесі експлуатації на діючих ТЕС, підтверджують ефективність «маловитратної» модернізації – використання технології «Блоки підвищеної ефективності» [13].

Висновки

- 1) При глибокому охолодженні вихідних газів котлів покращуються економічні і екологічні характеристики електростанцій.
- 2) Додаткова потужність, отримана в схемах БПЕ, в 3–5 разів дешевше, ніж на нових блоках, що вводяться в експлуатацію.
- 3) Технологія БПЕ сприяє: підвищенню ККД котла (за рахунок зниження температури відхідних газів і більш повного використання теплоти палива); отриманню виробітку додаткової електричної енергії на тепловому споживанні (за рахунок пари відборів, що «витіснені»); заміні пікової резервної потужності в енергосистемі за рахунок збільшення конденсаційного виробітку електроенергії на ТЕС; зменшенню викидів в навколишнє середовище; підвищенню ККД електрофільтрів (за рахунок зниження температури димових газів).

Список літератури: 1. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України [Текст] / І. А. Вольчин, Н. І. Дунаєвська, Л. С. Гапонич, М. В. Чернявський, О. І. Токал, Я. І. Засядько. – К.: ГНОЗІС, 2013. – С. 28. 2. Эффективность комплексной модернизации хвостовой части действующих пылеугольных котлов [Текст] / В. А. Медведев, А. У. Липец, Н. В. Пономарева, Г. Д. Бухман, С. М. Кузнецова // Теплоэнергетика. – 1999. – № 8. – С. 43–47. 3. О повышении эффективности теплоэнергетического оборудования [Текст] / А. П. Берсенев, Н. Ф. Немировский, В. Г. Овчар, В. В. Гордеев, А. У. Липец // Теплоэнергетика. – 1998. – № 5. – С. 51–54. 4. Кругликов, П. А. Выбор принципиальных схемных решений угольного энергоблока на сверхкритические параметры пара [Текст] / П. А. Кругликов, Ю. В. Смолкин, К. В. Соколов // Теплоэнергетика. – 2011. – № 9. – С. 9–16. 5. Резинских, В. Ф. Надежность и безопасность ТЭС России на современном этапе [Текст] / В. Ф. Резинских, Е. А. Гринь // Теплоэнергетика. – 2010. – № 1. – С. 2–8. 6. Анализ показателей

надежности вспомогательного оборудования энергоблоков [Текст] / К. Э. Андерсон, Ю. М. Бродов, П. Н. Плотников и др. // Теплоэнергетика. – 2011. – № 8. – С. 2–7. **7.** Соколов, А. В. Эффективность использования теплоты дымовых газов за регенеративными вращающимися воздухоподогревателями [Текст] / А. В. Соколов, В. С. Белоусов, А. Ю. Большихин // Электрические станции. – 2012. – № 10. – С. 40–42. **8.** Зиганшина, С. К. Способы утилизации теплоты вентиляционного воздуха дымовых труб ТЭС [Текст] / С. К. Зиганшина, А. А. Кудинов // Электрические станции. – 2010. – № 4. – С. 22–27. **9.** Пашенко, Д. И. Термохимическая регенерация тепла дымовых газов путем конверсии биоэтанола [Текст] / Д. И. Пашенко // Теплоэнергетика. – 2013. – № 6. – С. 59–64. **10.** Галузева програма розвитку теплових електростанцій та теплоелектроцентралей (будівництво, реконструкція, модернізація) [Текст] // Центр сприяння впровадженню реформ в енергетиці. – К., 2006. – 47 с. **11.** Овчар, В. Г. Опыт заводских разработок энергоблоков повышенной эффективности [Текст] / В. Г. Овчар, В. В. Гордеев, И. А. Сотников, А. У. Липец // Теплоэнергетика. – 1999. – № 9. – С. 2–5. **12.** Пат. № 2160369 Российская Федерация, МПК F01K7/40. Энергетический блок повышенной эффективности / А. У. Липец, Л. В. Дырина, С. М. Кузнецова, В. В. Гордеев, Ю. А. Ершов, Д. М. Буднянский; Заявитель и патентообладатель ОАО «Подольский машиностроительный завод». – № 99101363/06; заявл. 20.01.1999; опубл. 10.12.2000, Бюл. № 4. – 5 с. **13.** Овчар, В. Г. Дополнительная мощность, получаемая при переводе энергоблоков на схему БПЭ [Текст] / В. Г. Овчар, А. У. Липец, С. М. Кузнецова, Л. В. Дырина // Теплоэнергетика. – 1999. – № 9. – С. 6–9. **14.** Смышляев, А. А. Новые разработки пилеугольных котлов [Текст] / А. А. Смышляев, В. И. Щелоков, С. А. Евдокимов и др. // Электрические станции. – 2010. – № 5. – С. 10–16. **15.** Система встроенных теплообменников [Текст] // Ресурсо- и энергосбережения в Сибирском регионе. Сб. тезисов докладов. Постоянно действующий международный семинар. Заседание 3. – Новосибирск, 2000. – 239 с. **16.** Ногин, В. И. Разработка оптимальных технических решений по реконструкции тепломеханического оборудования ТЭС АО Мосэнерго [Текст] / В. И. Ногин // Электрические станции. – 1998. – № 6. – С. 39–48. **17.** Стырикович, М. А. О модернизации газомазутных блоков [Текст] / М. А. Стырикович, А. П. Берсенов, В. В. Гордеев и др. // Энергетик. – 1996. – № 10. – С. 7–8.

Bibliography (transliterated): **1.** Vol'chyn, I. A., et al. *Perspektyvy vprovadzhennja chystykh vugil'nyh tehnologij v energetyku Ukrainy*. Kiev: GNOZIS, 2013. Print. **2.** Medvedev, V. A., et al. "Jеffektivnost' kompleksnoj modernizacii hvostovoj chasti dejstvujushhijh pylеugol'nyh kotlov." *Teplojenergetika* 8 (1999): 43–47. Print. **3.** Bersenev, A. P., et al. "O povyshenii jеffektivnosti teplojenergeticheskogo oborudovanija." *Teplojenergetika* 5 (1998): 51–54. Print. **4.** Kruglikov, P. A., Ju. V. Smolkin and K.V. Sokolov. "Vybor principial'nyh shemnyh reshenij ugol'nogo jenerglobloka na superkriticheskie parametry para." *Teplojenergetika* 9 (2011): 9–16. Print. **5.** Rezinskih, and V. F., E. A. Grin'. "Nadezhnost' i bezopasnost' TES Rossii na sovremennom jetape." *Teplojenergetika* 1 (2010): 2–8. Print. **6.** Anderson, K. Je., et al. "Analiz pokazatelej nadezhnosti vspomogatel'nogo oborudovanija jenergloblokov." *Teplojenergetika* 8 (2011): 2–7. Print. **7.** Sokolov, A. V., V. S. Belousov and A. Ju. Bol'shihin. "Jеffektivnost' ispol'zovanija teploty dymovyh gazov za regenerativnymi vrashhajushhimisja vozduhopodogrerateljami." *Jelektricheskie stancii* 10 (2012): 40–42. Print. **8.** Ziganshina, S. K., and A. A. Kudinov. "Sposoby utilizacii teploty ventiljacionnogo vozduha dymovyh trub TJeS." *Jelektricheskie stancii* 4 (2010): 22–27. Print. **9.** Pashhenko, D. I. "Termohimicheskaja regeneracija tepla dymovyh gazov putem konversii biojetanola." *Teplojenergetika* 6 (2013): 59–64. Print. **10.** "Galuzeva programa rozvytku teplovyh elektrostancij ta теплоелектроцентралей (budivnyctvo, rekonstrukcija, modernizacija)." *Centr sprjannja vprovadzhennju reform v energetyci*. Kiev, 2006. Print. **11.** Ovchar, V. G., et al. "Opyt zavodskih razrabotok jenergloblokov povyshennoj jеffektivnosti." *Teplojenergetika* 9 (1999): 2–5. Print. **12.** Lipec, A.U., et al. "Jenergeticheskij blok povyshennoj jеffektivnosti." RU Patent 2160369 (MPK F01K7/40). 10 December 2000. **13.** Ovchar, V. G., et al. "Dopolnitel'naja moshhnost', poluchaemaja pri perevode jenergloblokov na shemu BPJe." *Teplojenergetika* 9 (1999): 6–9. Print. **14.** Smyshljaev, A. A., et al. "Novye razrabotki pylеugol'nyh kotlov." *Jelektricheskie stancii* 5 (2010): 10–16. Print. **15.** "Sistema vstroennyh teploobmennikov." *Resurso- i jenergosberezenija v Sibirskom regione. Sb. tezisov dokladov. Postojanno dejstvujushhij mezhdunarodnyj seminar. Zasedanie 3*. Novosibirsk, 2000. Print. **16.** Nogin, V. I. "Razrabotka optimal'nyh tehnicheskijh reshenij po rekonstrukcii teplomehanicheskogo oborudovanija TJeS AO Mosjenergo." *Jelektricheskie stancii* 6 (1998): 39–48. Print. **17.** Styrikovich, M. A., et al. "O modernizacii gazomazutnyh blokov." *Jenergetik* 10 (1996): 7–8. Print.

Поступила (received) 17.01.2014