

**Шелешей Т.В.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ СТОСОВНО ПОНИЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ДИМОВИХ ГАЗІВ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ВПЛИВУ НА НИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ І РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ

*Нагальним є пошук шляхів підвищення надійності та економічності діючих ТЕЦ шляхом вдосконалення процесів спалювання газу, зниження теплових викидів у навколишнє середовище, витрат електроенергії на власні потреби. Встановлено, що одним з основних факторів, які впливають на оптимальну температуру димових газів, є температура живильної води. Найбільш адекватною до експлуатаційних умов є квадратична залежність. У процесі дослідження даних графіків встановлено, що температура відхідних газів зростає з ростом температури живильної води. Зниження температури відхідних газів і корисне використання їх тепла у циклі ТЕС дає змогу підвищити ККД котла і всієї станції загалом. Переваги з екологічної точки зору є такими: зниження температури відхідних газів призводить до зниження викидів оксидів азоту і оксидів вуглецю.*

**Ключові слова:** котел, змінний режим експлуатації, температура відхідних газів, електрична потужність, теплове навантаження, температура та витрата живильної води.

**Постановка проблеми.** Електроенергетична галузь є одною із важливих складових частин паливно-енергетичного комплексу (ПЕК) України. Показником, що об'єктивно характеризує роботу галузі, є її здатність надійно і безперебійно забезпечувати електричною і тепловою енергією як населення, так і промисловість у необхідних об'ємах і відповідній якості [1]. Стан електроенергетики на сучасному його етапі є критичним. Нині 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 [2; 3]. У зв'язку з цим нагальним є пошук шляхів підвищення надійності та економічності наявних ТЕЦ шляхом вдосконалення процесів спалювання газу, зниження теплових викидів у довкілля, витрат електроенергії на власні потреби. Одним з ефективних методів маловитратної модернізації котлів та ТЕС загалом із метою підвищення їх економічності є зниження температури димових газів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Утилізація теплових вторинних енергоресурсів, до яких, передусім, варто зарахувати тепло димових газів котлів, є найбільш окупним технічним рішенням. До таких технологічних процесів зараховують глибоку утилізацію теплоти із застосування теплообмінних апаратів у системах регенерації ТЕС, використання парогазових установок тощо. Всі ці заходи дають змогу підвищити кое-

фіцієнт використання палива, зменшити шкідливі викиди, збільшення теплопродуктивності котла, підвищення ККД котла, зменшення перепадів температур газів і повітря, збільшення потужності турбіни на 5–8% [4]. Утилізація теплоти димових газів котлів шляхом установки теплообмінників у конвективній шахті для нагріву води на власні потреби та теплопостачання або підвищення електричної потужності енергоблоків за технологією «Блоки підвищеної ефективності» – БПЕ [5].

Технологія «БПЕ» реалізується встановленням у тракці димових газів котлів спеціальних теплообмінників (турбінного економайзера – ТуЕ), які включаються в байпаси системи регенерації турбін [6]. При цьому подача живильної води чи конденсату в котельний економайзер (ЕКО) здійснюється двома потоками: основним і байпасним, що відводиться з тракту живильної води перед регенеративними підігрівачами та поступає в турбінний економайзер. У ньому вода нагрівається завдяки відбору тепла від димових газів і подається в ЕКО в суміш з основним потоком (рис. 1).

**Постановка завдання.** Проведений аналіз літературних джерел спонукає сформулювати основні завдання статті: визначити залежності температури димових газів від температури блочного типу та з поперечними зв'язками; встановити регресійно-кореляційну залежність температури димових газів від параметрів живильної води, палива та навантажень блоку; обґрунтувати рекомендації щодо пониження температури димових газів.

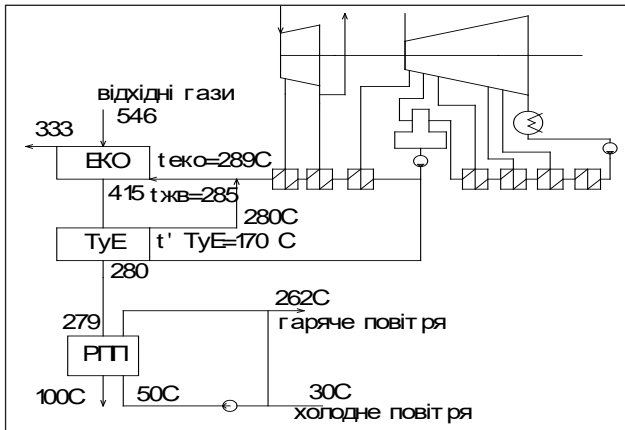


Рис. 1. Принципова схема включення турбінного економайзера в теплову схему турбіни [7]

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

У статті наведено низку досліджень щодо визначення оптимальних температур живильної води і відхідних газів у стаціонарних режимах, який показує, що цим питанням приділяється досить велика увага і їх варто вважати доволі актуальними. Але дані з визначення домінуючої складової частини впливу експлуатаційних та режимних параметрів роботи ТЕС при змінних навантаженнях на температуру відхідних газів газомазутних та пилувугільних котлів ТЕС відсутні. Дані для розрахунку були надані Київською ТЕЦ-5 за 2012–2013 рр. (енергоблок із турбіною Т-250-240 та котлом ТГМП-314А (станційний № 3, 4) та блок із турбіною Т-100-130 і котлоагрегатом ТГМ 96А (станційний № 1)), Трипільською ТЕС за 2016 р. (блок із турбіною К-300-240 і котлом ТПП-210А (станційний № 1-4)). Розрахунки проводились за допомогою математичного методу планування експерименту, що дає змогу отримувати математичну модель процесу [8].

У результаті проведених розрахунків отримано функціональні залежності режимів роботи (навантажень при виробітку електроенергії та теплоти, температури та витрати живильної води) та  $t_{\text{відх}}$  для котлоагрегату ТГМП-314А:

$$\frac{t_{\text{max}}}{t_{\text{min}}} = -985,61 - 0,005 \cdot \frac{D}{D_0} + 8,09 \cdot \frac{t_{\text{жв}}}{t_{\text{жв}}^0} - 0,048 \cdot \frac{Q}{Q_{\text{ном}}} + 2,03 \cdot \frac{N_c}{N_c^{\text{ном}}} - 6,42 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 - 0,0174 \cdot \left(\frac{t_{\text{жв}}}{t_{\text{жв}}^0}\right)^2 - 0,00025 \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{ном}}}\right)^2 - 0,006 \cdot \left(\frac{N_c}{N_c^{\text{ном}}}\right)^2 + 6,42 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{D}{D_0} \cdot \frac{t_{\text{жв}}}{t_{\text{жв}}^0} \cdot \frac{Q}{Q_{\text{ном}}} \cdot \frac{N_c}{N_c^{\text{ном}}}, \quad (1)$$

Аналіз показників котлів типу ТГМП-314А Київської ТЕЦ-5 дав змогу встановити ступінь впливу режимів роботи на  $t_{\text{відх}}$ . Перевірка адекватності отриманих рівнянь використаним даним – за критерієм R. Розрахункові значення критерію становить  $R=0,956$ .

У процесі встановлення залежностей експлуатаційних режимів роботи (навантажень при виробітку електроенергії та теплоти, температури та витрати живильної води) та  $t_{\text{відх}}$  для котлоагрегату ТГМ-96А отримано таке рівняння:

бітку електроенергії та теплоти, температури та витрати живильної води) та  $t_{\text{відх}}$  для котлоагрегату ТГМ-96А отримано таке рівняння:

$$\frac{t_{\text{max}}}{t_{\text{min}}} = 200,92 - 0,028 \cdot \frac{D_{\text{жв}}}{D_{\text{жв}}^0} + 1,0243 \cdot \frac{t_{\text{жв}}}{t_{\text{жв}}^0} + 0,0607 \cdot \frac{Q}{Q^0} + 0,5049 \cdot \frac{N_c}{N_c^0} + 9,63 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{D_{\text{жв}}}{D_{\text{жв}}^0}\right)^2 + 0,00193 \cdot \left(\frac{t_{\text{жв}}}{t_{\text{жв}}^0}\right)^2 + 0,00026 \cdot \left(\frac{Q}{Q^0}\right)^2 - 0,00103 \cdot \left(\frac{N_c}{N_c^0}\right)^2 - 1,4 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{D_{\text{жв}}}{D_{\text{жв}}^0} \cdot \frac{t_{\text{жв}}}{t_{\text{жв}}^0} \cdot \frac{Q}{Q^0} \cdot \frac{N_c}{N_c^0}, \quad (2)$$

Отримані результати розрахункового дослідження свідчать про те, що найбільший вплив на температуру відхідних газів має температура живильної води (в усьому інтервалі зміни режимних параметрів С при збільшенні температури живильної води на 10°C температура відхідних газів зростає в середньому на 5°C). Наступним чинником впливу на температуру відхідних газів є електричне навантаження. Найменший вплив дає витрата живильної води (температура відхідних газів зростає приблизно на 1,5°C при збільшенні витрати живильної води на 10 т/год), а також теплове навантаження блоку (при збільшенні теплового навантаження на 10 МВт температура відхідних газів зростає приблизно на 1°C).

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що найбільший вплив на температуру відхідних газів має температура живильної води. На рис. 2 наведено залежність (на основі добових відомостей режиму) температури відхідних газів від температури живильної води при значеннях електричної та теплової потужності для котлоагрегату ТГМП-314А.

Як видно з рис. 2, температура відхідних газів зростає на 6°C при зміні температури живильної води на 10°C у всьому діапазоні зміни електричної потужності.

У цій роботі проводився також порівняльний аналіз зміни температури відхідних газів при зміні параметрів живильної води для енергоблоку з турбіною Т-100-130 та котлом ТГМ-96А. Відповідні результати досліджень для температури та витрати живильної води наведено на рис. 3.

Одержані дані свідчать, що спостерігаються аналогічні тенденції в зростанні температури відхідних газів як для блоку з турбіною 250 МВт, так і для блоку 100 МВт. Це зростання становить 7°C для навантаження до «економічного» і 10°C для електричного навантаження від «економічного» до «номінального» при зростанні температури живильної води на 10°C.

Аналіз результатів залежності температури відхідних газів від різних факторів для котлів ТП-15 і ТП-170 Дарницької ТЕЦ свідчить, що температура відхідних газів зростає на 7,7°C на кожні 10°C зростання температури живильної води і на 2,28°C на кожні 10°C зростання витрати живильної води. Інші фактори впливу на температуру відхідних газів не мають.

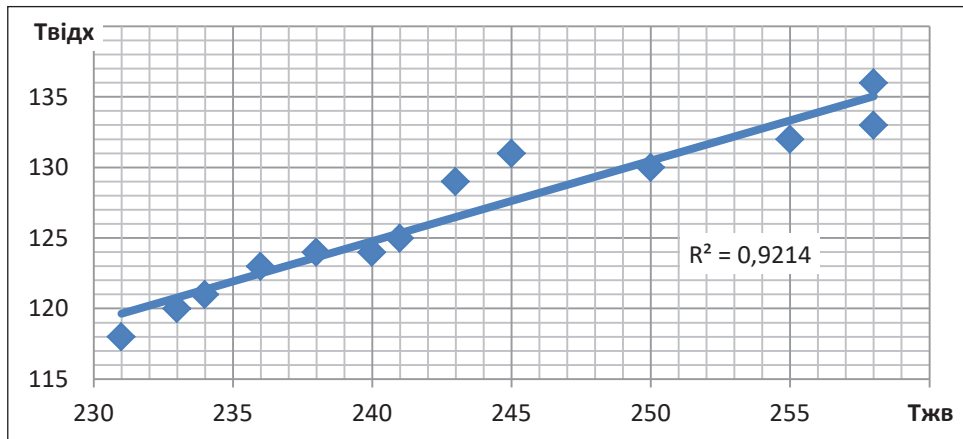


Рис. 2. Залежність температури відхідних газів від температури живильної води для значень електричної потужності  $N_E=(165-250)$  МВт,  $D_{жв}=(570-950)$  т/год,  $Q_t=(140-376)$  МВт

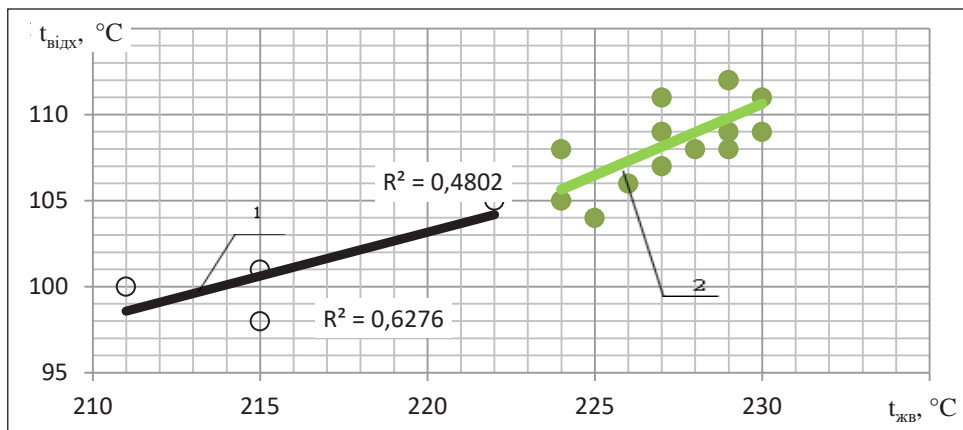


Рис. 3. Залежність температури відхідних газів від температури живильної води для значень електричної потужності:  
1 –  $N_E=(65-80)$  МВт,  $D_{жв}=(290-294)$  т/год,  $Q_t=(304-373)$  МВт 2 –  $N_E=(80-100)$  МВт

Дослідження проводилися не тільки для тепло-електроцентралей, а й для станцій, призначених для виробництва електроенергії. На графіках 4 показані залежності температури відхідних газів від температури живильної води при постійних витратах живильної води, електричного і теплового навантаження (станційні номери № 1–4).

З рисунків 3.25–3.26 видно, що при  $N_E=(100-240)$  МВт,  $Q_t=(70-100)$  МВт температура відхідних газів постійно зростає в середньому на  $2^\circ\text{C}$ , коли температура живильної води зростає на  $10^\circ\text{C}$  і при  $N_E=(240-300)$  МВт,  $Q_t=(70-100)$  МВт температура відхідних газів є постійною і становить  $159^\circ\text{C}$ .

Зниження температури відхідних газів і корисне використання їх тепла у циклі ТЕС дає змогу підвищити ККД котла і всієї станції загалом [9; 10].

Розрахунковий ККД котельного агрегату зворотного теплового балансу визначається по наступній формулі:

$$\eta_{ка} = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6, \% \quad (3)$$

де,  $q_2$  – втрати тепла з відхідними газами, %;  $q_3$  – втрати тепла з хімічним недопалом, %;  $q_4$  – втрати тепла з механічним недопалом, %;  $q_5$  – втрати тепла в навколишнє середовище, %;  $q_6$  – втрати тепла з шлаком і летючої золою, %.

Втрати  $q_2$ , %, визначаються, насамперед, температурою відхідних газів котла  $t_{відх}$ ,  $^\circ\text{C}$ . Як вже встановлено, величина  $t_{відх}$  залежить від багатьох чинників (виду палива, компонування поверхонь нагріву котла, ступінь їх забруднення тощо) та її вибір є техніко-економічним завданням. Розглянемо вплив  $t_{відх}$  на ККД котла та екологічні показники для блоків Т-250-240, Т-100-130 при спалюванні природного газу і для К-300-240 при спалюванні кам'яного вугілля.

Підвищення ККД котла типу ТГМП-314А без зниження надійності поверхонь нагріву конвективної шахти при спалюванні природ-

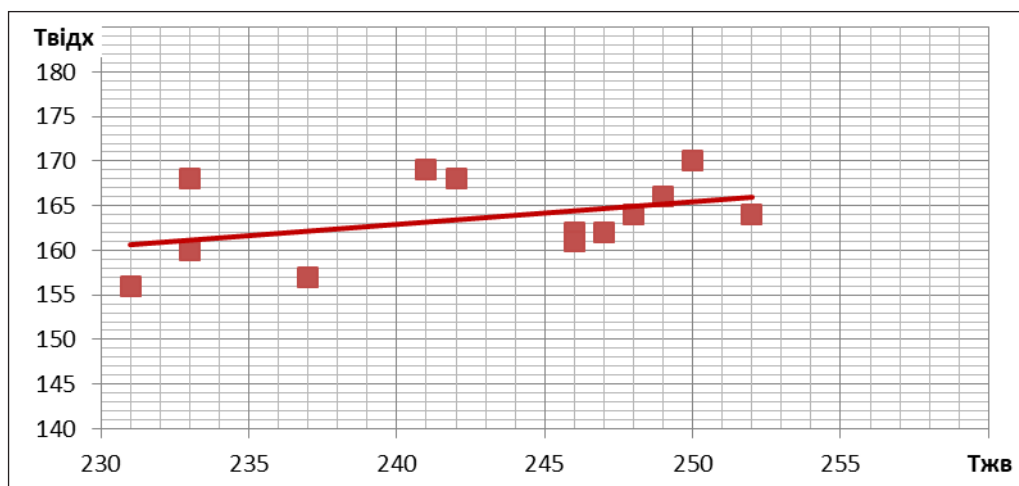


Рис. 4. Залежність температури відхідних газів від температури живильної води для котла ТПП-210А (ст. № 1)  $N_e=(100-240)$  МВт,  $Q_r=(3-15)$  МВт

ного газу може становити до 0,7%. При цьому питомі витрати умовного палива зменшаться на 1,61 г.у.п/кВт·год. Переваги з екологічної точки зору є такими: зниження температури відхідних газів призводить до зниження викидів оксидів азоту на 250 г/ГДж і зниження оксидів вуглецю на 52 г/ГДж. Щодо котла ТГМ-96А то зниження температури відхідних газів до безпечної для надійності газовідвідних трактів котла, це призведе до підвищення ККД котла на 0,14% (економія умовного палива 0,32 г.у.п/кВт·год). Зниження викидів оксидів азоту і вуглецю становить 40г/ГДж і 10г/ГДж відповідно. Приріст ККД для котла ТПП-210 А при спалюванні кам'яного вугілля без зниження надійності становить 0,6%. Зменшення емісій оксидів сірки, азоту і вуглецю становлять 720г/ГДж, 220г/ГДж і 110 г/ГДж відповідно.

В результаті математичних розрахунків встановлено, що температура відхідних газів – багатofакторна залежність режимних та експлуатаційних показників, а саме температури та витрати живильної води, електричне та теплове навантаження блоку. У зв'язку з цим проведено розрахунків енергоблоків Т-110-130 і Т-250-240 Київської ТЕЦ-5 і К-300-240 ТпТЕС за методикою, запропонованою Новосибірським державним технічним університетом [11]. Результати розрахунків енергоблоків на базі турбін Т-100-130, Т-250-240, К-300-240 зведені в таблиці 1.

При підвищенні ефективності теплофікаційного енергоблоку на базі турбіни Т-110/120-130 шляхом утилізації теплоти димових газів зі зниженням їх температури зі 110°C до 106°C можна знизити температуру живильної води до 218°C (замість 232°C), підвищити ККД котла

до -91,5% (замість 90%), знизити частку регенеративного відбору до -0,295 (замість 0,31), при цьому збільшити конденсаційну вироблення на -620 кВт і заощадити паливо в ЕС на -300 т/рік.

**Висновки.** Проведено дослідження впливу експлуатаційних (температура та витрата живильної води) і режимних (теплова та електрична потужність енергоблоку) на температуру димових газів для газомазутних блоків Київської ТЕЦ-5 (блоки Т-250/300-240 і Т-100/110-130). Температура відхідних газів зростає на 6°C при зміні температури живильної води на 10°C у всьому діапазоні зміни електричної потужності. Підвищення ККД котла типу ТГМП-314А без зниження надійності поверхонь нагріву конвективної шахти у процесі спалювання природного газу може становити до 0,7%. При цьому питомі витрати умовного палива зменшаться на 1,61 г.у.п/кВт·год. Переваги з екологічної точки зору є такими: зниження температури відхідних газів призводить до зниження викидів оксидів азоту на 250 г/ГДж і зниження оксидів вуглецю на 52 г/ГДж. Щодо котла ТГМ-96А то зниження температури відхідних газів до безпечної для надійності газовідвідних трактів котла, то це призведе до підвищення ККД котла на 0,14% (економія умовного палива 0,32 г.у.п/кВт·год). Зниження викидів оксидів азоту і вуглецю становить 40г/ГДж і 10г/ГДж відповідно. Приріст ККД для котла ТПП-210А під час спалювання кам'яного вугілля без зниження надійності (за таблицею 2.2) становить 0,6%. Зменшення емісій оксидів сірки, азоту і вуглецю становлять 720г/ГДж, 220г/ГДж і 110 г/ГДж відповідно.

## Результати розрахунків енергоблоків на базі турбін Т-100-130, Т-250-240, К-300-240

№ п/п	Назва величини	Од. виміру	Величина		
			Т-100-130	Т-250-240	К-300-240
1. Розрахунок підвищення вироблення електроенергії					
1.	Частка пари, що відбирається на регенерацію базового енергоблоку		0,31	0,328	0,266
2.	Частка пара, що відбирається на регенерацію БПЕ		0,298	0,310	0,24
3.	Потужність на клеммах генератора базового енергоблоку	кВт	107557	249782	300000
4.	Потужність на клеммах генератора БПЕ	кВт	108028	253004,6	303356,47
5.	Додаткова потужність на клеммах генератора БПЕ	кВт	471	3222,6	3356,47
2. Зниження витрати палива при зниженні пропуску пара					
6.	ККД котла базового енергоблоку		0,914	0,92	0,86
7.	ККД котла БПЕ		0,921	0,93	0,873
8.	Економія палива при зниженні пропуску пара	кг/с	0,144	0,3	0,395
3. Оцінка ефекту від витіснення в енергосистемі пікової резервної потужності					
9.	Витрата теплоти турбіною	кВт	341145	634495	445095,5
10.	ККД турбогенераторної установки з виробництва електроенергії		0,427	0,458	0,44
4. Обмеження на підвищення ефективності по температурі димових газів					
11.	Температура димових газів БПЕ	°С	106	125	153

## Список літератури:

- Інноваційні пріоритети паливно-енергетичного комплексу України / заг. ред. А.К. Шидловський. Київ : Українські енциклопедичні знання, 2005. 512 с.
- He J., Zhang W. Techno-economic evaluation of thermo-chemical biomaffi-io-ethanol. *Appl. Energy*. 2011. № 4 (88). P. 1224–1232.
- Вольчин І.А., Дунаєвська Н.І., Гапонич Л.С. та ін. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України. Київ : ГНОЗІС. 2013. С. 28.
- Медведев В.А., Липец А.У., Пономарева Н.В. и др. Эффективность комплексной модернизации хвостовой части действующих пылеугольных котлов. *Теплоэнергетика*. 1999. № 8. С. 43–47.
- Андерсон К.Э., Бродов Ю.М., Плотников П.Н. и др. Анализ показателей надежности вспомогательного оборудования энергоблоков. *Теплоэнергетика*. 2011. № 8. С. 2–7.
- Овчар В.Г., Гордеев В.В., Сотников И.А., Липец А.У. Опыт заводских разработок энергоблоков повышенной эффективности. *Теплоэнергетика*. 1999. № 9. С. 2–5
- Коваленко П.Ю. Оптимизация энергоблоков повышенной эффективности на основе турбин Т-100-130. *Энергосистемы, электростанции и их агрегаты* : Сборник научных трудов НГТУ. Вып. 8. Новосибирск : Изд-во НГТУ. 2004. С. 62–79.
- Коваленко П.Ю., Шинников П.А. Повышение эффективности угольных энергоблоков ТЭЦ (методика оценки). *Теплоэнергетические агрегаты и системы*. Сборник научных трудов НГТУ. Выпуск 7, Новосибирск : Изд-во НГТУ 2003. С. 27–36.
- Шинников П.А., Коваленко П.Ю., Зыкова Н.Г. О повышении эффективности энергоблоков ТЭС. *Энергосистемы, электростанции и их агрегаты* : Сборник научных трудов. Выпуск 8. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. С. 28–35.
- Шинников П.А., Ноздренко Г.В., Ловцов А.А. Эффективность реконструкции пылеугольных паротурбинных ТЭЦ в парогазовые путем газотурбинной надстройки и исследование показателей их функционирования. Новосибирск : Наука, 2002. 97 с.
- Шинников П.А., Серант Ф.А., Коваленко П.Ю. и др. Повышение эффективности энергоблоков ТЭЦ. *Ползуновский вестник №1*. Барнаул : Изд-во АлтГТУ им. Ползунова, 2004. С. 210–215.
- Шелешей Т.В. Взаємозв'язок температури відхідних газів і техніко-економічних та екологічних показників ТЕЦ. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія : Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2018. № 11(1287). С. 32–35.

## РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПониЖЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЛИЯНИЯ НА НИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

*Актуальным является поиск путей повышения надежности и экономичности действующих ТЭЦ путем совершенствования процессов сжигания газа, снижение тепловых выбросов в окружающую среду, расходов электроэнергии на собственные нужды. Установлено, что одним из основных факторов, влияющих на оптимальную температуру дымовых газов, является температура питательной воды. Наиболее адекватным эксплуатационным условием является квадратичная зависимость. При исследовании данных графиков установлено, что температура отходящих газов возрастает с ростом температуры питательной воды. Снижение температуры уходящих газов и полезное использование их тепла в цикле ТЭС позволяет повысить КПД котла и всей станции в целом. Преимуществом, с экологической точки зрения, является то, что снижение температуры уходящих газов приводит к снижению выбросов оксидов азота и оксидов углерода.*

**Ключевые слова:** котел, сменный режим эксплуатации, температура отходящих газов, электрическая мощность, тепловая нагрузка, температура и расход питательной воды.

## DEVELOPMENT OF TECHNICAL SOLUTIONS ON THE REDUCTION OF THE DEMOGRAPHIC GAS TEMPERATURE ON INVESTIGATION ON THEIR OPERATIONAL AND REGULATORY PARAMETERS

*The urgent task is to find ways to improve the reliability and efficiency of existing CHP plants by improving the combustion processes, reducing thermal emissions into the environment, and consuming electricity for own needs. It is established that one of the main factors influencing the optimum temperature of flue gases is the temperature of the feed water. Quadratic dependence is the most adequate to the operating conditions. In the study of these graphs it was found that the temperature of the waste gases increases with the increase in the temperature of the feed water. Reducing the temperature of the waste gases and the useful use of their heat in the cycle of TES, can increase the efficiency of the boiler and the entire station as a whole. Ecological advantages are as follows: lowering the temperature of the waste gases leads to a reduction in emissions of nitrogen oxides and carbon monoxide.*

**Key words:** boiler, variable operating mode, temperature of exhaust gases, electric power, thermal load, temperature and consumption of feed water.