

**Т. В. ШЕЛЕШЕЙ**

### ВПЛИВ ЗМІНИ ТЕПЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ КОТЛІВ ГАЗОМАЗУТНИХ ТЕЦ

Нагальним є пошук шляхів підвищення надійності та економічності діючих ТЕЦ шляхом вдосконалення процесів спалювання газу, зниження теплових викидів в 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. При дослідженні даних графіків встановлено, що температура відхідних газів зростає з ростом теплової потужності.

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

**Т. В. ШЕЛЕШЕЙ**

### ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОЙ НАГРУЗКИ НА ТЕМПЕРАТУРУ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ КОТЛОВ ГАЗОМАЗУТНЫХ ТЭЦ

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 адекватной эксплуатационных условий является квадратичная зависимость. При исследовании данных графиков установлено, что температура отходящих газов возрастает с ростом тепловой мощности.

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

**T. SHELESHEY**

### INFLUENCE OF A CHANGE IN THE THERMAL LOADING ON THE TEMPERATURE OF EXHAUST GASES OF THE BOILERS USED BY GAS-&FUEL FIRED HEAT AND POWER PLANTS

The present-day state of power engineering is rather critical. In this connection, it is of great importance to search for the ways that would allow us to increase the reliability and economic efficiency of operating heat and power plants through the improvement of gas burning processes, and through a decrease in thermal emissions to the environment and in the electric power consumption for domestic needs. The objective of this research was to carry out the experimental computation investigation of a degree of influence of the thermal power on the temperature of exhaust gases of the boilers with the maintenance of the durability of gas exhaust channels. A review of the references showed that the heat utilization of flue gases allows for an increase in the fuel consumption coefficient, a decrease in unhealthy emissions and an increase in the boiler heat power with an increase in the coefficient of efficiency, and a decrease in gas and air temperature differences. It was established that one of the main factors that affect the optimal temperature of flue gases is the feed water temperature. The analysis of the boilers of a TGMP-314A type used by Kiev heat and power plant allowed us to establish a degree of the influence of operation modes on the exhaust gas temperature  $t_{exh}$ . The adequacy of derived equations and the used data was verified by the criterion  $R$ . Calculated values of the criterion are equal to  $R = 0.934$  for the linear relationship,  $R = 0.924$  for the power relationship and  $R = 0.956$  for the quadratic relationship. The most adequate relationship for operation conditions is considered to be the quadratic relationship. Investigation of the given diagrams showed that the temperature of exhaust gases is increased with an increase in the thermal power by  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $t_{fw} = (230-242)\text{ }^{\circ}\text{C}$   $N_E = 163-190\text{ MW}$ ). It is slightly increased in the range of  $t_{fw} = (255-258)\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $N_E = 220-250\text{ MW}$  from  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $133\text{ }^{\circ}\text{C}$  and it allows us to reduce the temperature of flue gases by  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$  on average taking into consideration the reliability of convective heating surfaces.

**Key words:** boiler, interchangeable operation mode, exhaust gas temperature, electric power, thermal loading, and the life water temperature and consumption.

#### Вступ

Електроенергетична галузь являється одною із важливих складових 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 в необхідних об'ємах і відповідній якості [1]. Стан електроенергетики на сучасному його етапі являється критичним. Сьогодні в Україні особливо актуальною задачею є вирішення проблеми надійної та економічної роботи обладнання теплових електростанцій (ТЕС), яке фізично й мо-

рально застаріло та потребує модернізації, реконструкції чи повної заміни [2, 3]. В зв'язку з цим, нагальним є пошук шляхів підвищення надійності та економічності діючих ТЕЦ шляхом вдосконалення процесів спалювання газу, зниження теплових викидів в навколишнє середовище, витрат електроенергії на власні потреби.

Одним з ефективних методів маловитратної модернізації ТЕЦ є зниження температури відхідних газів котлів ( $t_{відх}$ ). Відомо, що в котлах з камерним спалюванням втрати з фізичною теплотою відхідних газів  $q_2$  є найбільш істотними і складають (5–12) % [4]. Однак в наш час утилізація теплоти відхідних газів вимагає значних капіталов-

© Т. В. Шелешей, 2018

кладень та спеціальних випробувань на діючих об'єктах з урахуванням змінних електричних та теплових навантажень ТЕЦ [5–7].

### Мета роботи

Метою даної роботи є експериментально-розрахункові дослідження ступеню впливу теплової потужності на температуру відхідних газів котлів зі збереженням довговічності газовідвідних трактив.

### Огляд літератури

Літературний огляд показав, що утилізація теплоти димових газів дає можливість: підвищити коефіцієнт використання палива, зменшити шкідливі викиди, збільшення теплопродуктивності котла з підвищенням ККД, зменшення перепадів температур газів і повітря. Встановлено, що одним з основних факторів, які впливають на оптимальну температуру димових газів, є температура живильної води. Як показали дослідження А. В. Андрущенко, вибір оптимальної температури живильної води повинен проводитися з урахуванням залежності втрат теплоти з димовими газами [8, 9].

Огляд та аналіз досліджень щодо найвигіднішого розподілу теплосприйняття між ступенями нагріву економайзера і повітропідігрівника, включаючи спільне визначення оптимальних температур живильної води і відхідних газів, показує, що названим питанням приділяється велика увага і їх слід вважати достатньо обґрунтованими для стаціонарних режимів експлуатації ТЕЦ. Однак для реальних експлуатаційних умов характерна робота обладнання електростанцій на змінних режимах за завданням енергосистеми. Наукові дослідження зміни температури відхідних газів при нестационарних режимах роботи ТЕС в літературі майже відсутні.

### Основний виклад матеріалу

В огляді літератури наведено ряд досліджень щодо визначення оптимальних температур живильної води і відхідних газів в стаціонарних режимах, який показує, що даним питанням приділяється досить велика увага і їх слід вважати достатньо актуальними [7–12].

Дані для розрахунку були надані Київською ТЕЦ-5 за 2012–2013 роки (енергоблок з турбіною Т-250-240 та котлом ТГМП-314А (станційний

#### 1. Лінійна залежність

$$\frac{t_{\text{відх}}}{t_{\text{відх}}^0} = 106,62 - 0,0021 \frac{D_{\text{жв}}}{D_{\text{жв}}^0} - 0,0097 \frac{t_{\text{жв}}}{t_{\text{жв}}^0} + 0,04299 \frac{Q}{Q^0} + 0,053 \frac{N_E}{N_E^0}. \quad (4)$$

#### 2. Степенева залежність

№ 3, 4) та блок з турбіною Т-100-130 і котлоагрегатом ТГМ 96А (станційний № 1)), Трипільською ТЕС за 2016 рік (блок з турбіною К-300-240 і котлом ТПП-210А (станційний № 1–4)), Розрахунки проводились за допомогою математичного методу планування експерименту, що дозволяє отримувати математичну модель процесу [13].

При використанні методу планування експерименту в досліді варіюються всі фактори, а самі досліді визначаються обраним планом. Видом рівняння регресії також задаються. Для характеристик теплоенергетичного обладнання підходить поліном другого ступеня [14]:

$$y = b_0 + \sum_1^k b_i x_i + \sum_1^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

де  $b_i, b_{ij}, b_{ii}$  – оцінки коефіцієнтів рівняння регресії, в даному випадку полінома другого ступеня. Для даного дослідження вихідною величиною приймається температура відхідних газів, тобто  $y = t_{\text{відх}}$ . Змінними факторами є: витрата живильної води  $D_{\text{жв}}$ , м<sup>3</sup>/год; температура живильної води  $t_{\text{жв}}$ , °С; електрична потужність блока  $N_E$ , МВт; теплова потужність блока  $Q_t$ , МВт.

Оцінку адекватності дає коефіцієнт множинної кореляції

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_1^n (\hat{y}_j - y_j)^2}{\sum_1^n (y_j - \bar{y}_j)^2}}, \quad (2)$$

де  $y_j$  – поточне значення вихідної величини в  $j$ -м досліді;

$\hat{y}_j$  – розрахункове значення вихідної величини за отриманим рівнянням в  $j$ -м досліді;

$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_1^n y_j$  – середнє значення вихідної величини в  $n$  досліді.

Іншою оцінкою адекватності є залишкова дисперсія, яка характеризує розсіювання експериментальних точок щодо знайденої лінії регресії:

$$\sigma_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_1^n (\hat{y}_j - y_j)^2. \quad (3)$$

В 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:

$$\frac{t_{\text{відх}}}{t_{\text{відх}}^0} = 41,68 \left( \frac{D_{\text{жв}}}{D_{\text{жв}}^0} \right)^{0,0117} \left( \frac{t_{\text{жв}}}{t_{\text{жв}}^0} \right)^{0,0471} \left( \frac{Q}{Q^0} \right)^{0,0646} \left( \frac{N_E}{N_E^0} \right)^{0,07596} \quad (5)$$

### 3. Квадратична залежність

$$\begin{aligned} \frac{t_{\text{відх}}}{t_{\text{відх}}^0} = & -985,61 - 0,005 \frac{D_{\text{жв}}}{D_{\text{жв}}^0} + 8,09 \frac{t_{\text{жв}}}{t_{\text{жв}}^0} - 0,048 \frac{Q}{Q^0} + 2,03 \frac{N_E}{N_E^0} - 6,42 \cdot 10^{-5} \cdot \left( \frac{D_{\text{жв}}}{D_{\text{жв}}^0} \right)^2 - \\ & - 0,0174 \left( \frac{t_{\text{жв}}}{t_{\text{жв}}^0} \right)^2 - 0,00025 \left( \frac{Q}{Q^0} \right)^2 - 0,006 \left( \frac{N_E}{N_E^0} \right)^2 + 6,42 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{D_{\text{жв}}}{D_{\text{жв}}^0} \frac{t_{\text{жв}}}{t_{\text{жв}}^0} \frac{Q}{Q^0} \frac{N_E}{N_E^0}. \end{aligned} \quad (6)$$

Аналіз показників котлів типу ТГМП-314А Київської ТЕЦ-5 дозволив встановити ступінь впливу режимів роботи на  $t_{\text{відх}}$ . Перевірка адекватності отриманих рівнянь використаним даним – за критерієм  $R$ . Розрахункові значення критерію становлять  $R = 0,934$  (лінійна залежність),  $R = 0,924$  (степенева залежність)  $R = 0,956$  (квадратична залежність). Найбільш адекватною до експлуатаційних умов є квадратична залежність.

Отримані результати розрахункового дослідження свідчать про те, що найбільший вплив на температуру відхідних газів має температура живильної води (у всьому інтервалі зміни режимних параметрів  $C$  при збільшенні температури

живильної води на  $10^\circ\text{C}$  температура відхідних газів зростає, в середньому на  $5^\circ\text{C}$ ). Наступним чинником впливу на температуру відхідних газів є електричне навантаження. Найменший вплив дає витрата живильної води (температура відхідних газів зростає, приблизно, на  $1,5^\circ\text{C}$  при збільшенні витрати живильної води на  $10 \text{ т/год}$ ), а також теплове навантаження блоку (при збільшенні теплового навантаження на  $10 \text{ МВт}$  температура відхідних газів зростає, приблизно, на  $1^\circ\text{C}$ ).

На рис. 1 показано залежність температури відхідних газів від теплової потужності для сталих значень температури живильної води та електричного навантаження.

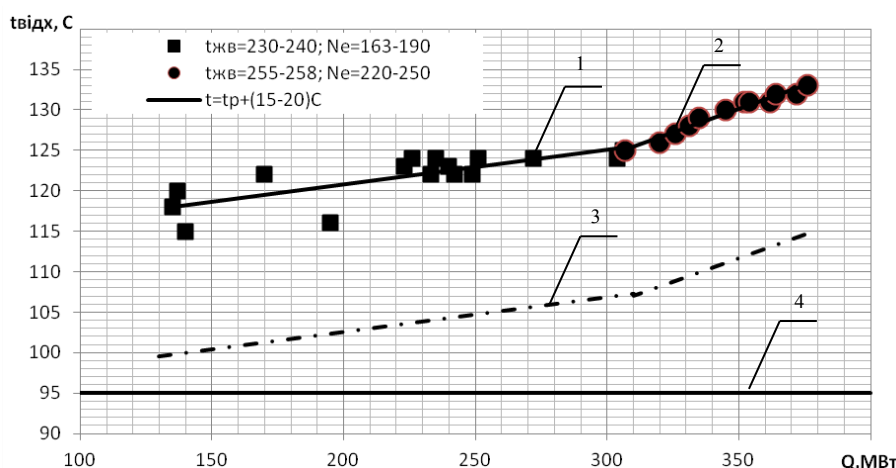


Рис. 1 – Залежність температури відхідних газів від теплової потужності для значень температури живильної води та значення «рекомендованої»  $t_{\text{відх}}$  з забезпеченням надійності поверхонь нагріву:

1 –  $t_{\text{жв}} = (230-240)^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_{\text{жв}} = (255-258)^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t = t_p + (15-20)^\circ\text{C}$ ; 4 – «рекомендована»  $t_{\text{відх}}$

При дослідженні даних графіків встановлено, що температура відхідних газів зростає з ростом теплової потужності на  $8^\circ\text{C}$  ( $t_{\text{жв}} = (230-242)^\circ\text{C}$ ;  $N_E = (163-190) \text{ МВт}$ ), незначно зростає в діапазоні  $t_{\text{жв}} = (255-258)^\circ\text{C}$  і  $N_E = (220-250) \text{ МВт}$  зі  $125^\circ\text{C}$  до  $133^\circ\text{C}$ . Це дозволяє, з урахуванням надійності конвективних поверхонь нагріву, знизити температуру димових газів в середньому на  $18^\circ\text{C}$ . Результати досліджень підтверджують, що найбільший вплив на температуру димових газів у всьому діапазоні зміни електричного навантаження блоку має температура живильної води (при збільшенні  $t_{\text{жв}}$  на  $5^\circ\text{C}$  температура димових газів зростає, в середньому, на  $2^\circ\text{C}$ ).

### Висновки

1. Літературний огляд показав, що утилізація теплоти димових газів дає можливість: підвищити коефіцієнт використання палива, зменшити шкідливі викиди, збільшення теплопродуктивності котла з підвищенням ККД, зменшення перепадів температур газів і повітря.

2. Результати досліджень експлуатаційних факторів показали, що найбільший вплив на температуру димових газів має температура живильної води (в інтервалі електричної потужності  $160-190 \text{ МВт}$  температура димових газів зростає в середньому на  $2^\circ\text{C}$  на кожні  $5^\circ\text{C}$  збільшення температури живильної води).

3. При дослідженні даних графіків встановлено, що температура відхідних газів зростає з ростом теплової потужності на  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $t_{\text{жв}} = (230\text{--}242)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $N_E = (163\text{--}190)\text{ МВт}$ , незначно зростає в діапазоні  $t_{\text{жв}} = (255\text{--}258)\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $N_E = (220\text{--}250)\text{ МВт}$  зі  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $133\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Це дозволяє, з урахуванням надійності конвективних поверхонь нагріву, знизити температуру димових газів в середньому на  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### Список літератури

1. Энергетична стратегія України на період 2030 р. від 15 березня 2006 р. № 145-р Київ : Розпорядження. Кабінет міністрів України. 2006. С. 166.
2. Елсуков В. К. Оценка возможности утилизации теплоты уходящих газов котлов на примере сжигания Канско-Ачинских углей. *Промышленная энергетика*. 2007. № 11. С. 21–27.
3. Медведев В. А., Липец А. У., Пономарева Н. В., Бухман Г. Д., Кузнецова С. М. Эффективность комплексной модернизации хвостовой части действующих пылеугольных котлов. *Теплоэнергетика*. 1999. № 8. С. 43–47.
4. Берсенева А. П., Немировский Н. Ф., Овчар В. Г., Гордеев В. В., Липец А. У. О повышении эффективности теплоэнергетического оборудования. *Теплоэнергетика*. 1998. № 5. С. 51–54.
5. Кругликов П. А., Смолкин Ю. В., Соколов К. В. Выбор принципиальных схемных решений угольного энергоблока на сверхкритические параметры пара. *Теплоэнергетика*. 2011. № 9. С. 9–17. ISSN 0040-3636.
6. Овчар В. Г., Гордеев В. В., Сотников И. А., Липец А. У. Опыт заводских разработок энергоблоков повышенной эффективности. *Теплоэнергетика*. 1999. № 9. С. 2–5.
7. Рамзин Л. К. К расчету котельных установок. *Известия Киевского общества для надзора за паровыми котлами*. Киев, 1914.
8. Толубинский В. И. Компонировка конвективных элементов котельного агрегата. *Сб. Киевского индустриального института*. Харьков, 1934.
9. Смышляев А. А., Щелоков В. И., Евдокимов С. А. и др. Новые разработки пылеугольных котлов. *Электрические станции*. 2010. № 5. С. 10–16. ISSN 0201-4564.
10. Ногин В. И. Разработка оптимальных технических решений по реконструкции тепломеханического оборудования ТЭС АО Мосэнерго. *Электрические станции*. 1998. № 6. С. 39–48.
11. Андрущенко А. И. Зависимость к.п.д. проектируемого котлоагрегата от температуры питательной воды : сб. науч. сообщений. *Саратовский автомобильный-дорожный институт*. Саратов, 1956. Вып. 4. 46 с.
12. Андрущенко А. И. О показателях эффективности циклов теплотехнических установок. *Изв. вузов СССР. Энергетика*. 1981. № 9. С. 36–39.
13. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. Москва: Наука, 1976. – 279 с.
14. Гиршфельд В. Я., Князев А. М., Куликов В. Е. *Режимы работы и эксплуатации ТЭС*. Москва: Энергия, 1980. 179 с.
15. Жидович О. В., Альшевский В. Н., Дужих Ф. П. Охлаждение газов в дымовых трубах. *Теплоэнергетика*. 1977. № 9. С. 44–47.

16. Безлюдный П. П., Семенюк Л. Г., Николаев В. Н., Пересичный М. И. Определение температуры точки росы продуктов сгорания природного газа. *Известия вузов СССР. Энергетика*. 1986. № 12. С. 89–91.

#### References (transliterated)

1. The Cabinet of Ministers of Ukraine (2006), *The energy strategy of Ukraine for the period 2030 of 15 March 2006*, No. 145-d Kiev, Kiev, Ukraine.
2. Yelsukov, V. K. (2007), "Evaluation of the possibility of utilization of exhaust gases heat the boilers at the example of burning Kansk-Achinsk coals", *Promyshlennaya Energetika*, No. 11, pp. 21–27.
3. Medvedev, V., Lipiec, A., Ponomarev, N., Buchman, G. and Kuznetsova, S. (1999), "And the Effectiveness of the comprehensive modernization of the tail section of the existing coal-fired boilers", *Teploenergetika*, No. 8, pp. 43–47.
4. Bersenev, A., Nemirovsky, N., Ovchar, V., Gordeev, V. and Lipiec, A. (1998), "Improving the efficiency of thermal power equipment", *Teploenergetika*, No. 5, pp. 51–54.
5. Kruglikov, P., Smolkin, V. and Sokolov, K. (2011), "Choice of principle schematics of a coal power unit for supercritical steam parameters", *Teploenergetika*, No. 9, pp. 9–17, ISSN 0040-3636.
6. Ovchar, V., Gordeev, V., Sotnikov, I. and Lipiec, A. (1999), "Experience of development of factory units with increased efficiency", *Teploenergetika*, No. 9, pp. 2–5.
7. Ramzin, L. K. (1914), "To the calculation of boiler plants", *Proceedings of the Kiev society for the surveillance of steam boilers*, Kiev, Ukraine.
8. Tolubinsky, V. I. (1934), "Arrangement of convective cells the boiler unit", *Proc. Kiev industrial Institute*, L 8, GONTI, Kharkov, Ukraine.
9. Smyshlyayev, A., Shchelokov, V. and Evdokimov, S. (2010), "New developments of coal-fired boilers", *Electric station*, No. 5, pp. 10–16, ISSN 0201-4564.
10. Nogin, V. (1998), "Development of optimal technical solutions for the reconstruction of thermal and mechanical equipment thermal power plant of JSC Mosenergo", *Electric station*, No. 6, pp. 39–48.
11. Andryushchenko, A. (1956), "The Dependence of the efficiency of the boiler design temperature of feed water", *Collection of scientific reports. SADI*, Vol. 4, Saratov, Russia.
12. Andryushchenko, A. (1981), "On the performance indicators of cycles of thermal installations", *Izv. universities of the USSR. Energy*, No. 9, pp. 36–39.
13. Adler, Y. P., Markova, E. V. and Granovsky, Y. V. (1976), *Planning an experiment when searching for optimal conditions*, Nauka [Science], Moscow, Russian.
14. Hirshfeld, V. Ya., Knyazev, A. M. and Kulikov, V. E. (1980), *Operation Modes and operation*, Energiya [Energy], Moscow, Russian.
15. Zhydovich, O. V., Alshevsky, V. N. and Dugih, F. P. (1977), "Cooling of gases in chimneys", *Teploenergetika*, No. 9, pp. 44–47.
16. Besludnyy, P. P., Semeniuk, L. G., Nikolaev, V. N. and Peresichna, M. I. (1986), "Determination of the dew point temperature of the combustion products of natural gas", *Izvestiya vuzov of the USSR. Energy*, No. 12, pp. 89–91.

Надійшла (received) 15.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Шелешей Тетяна Вікторівна (Шелешей Татьяна Викторовна, Sheleshey Tanya)** – асистент кафедри теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут»; м. Київ, Україна; e-mail: sheleshey\_tanya@ukr.net.