

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

THERMAL POWER  
ENGINEERING

УДК 621.311

## Показатели режимов работы ТЭЦ при эксергетическом анализе\*

О.В. БОРУШ<sup>1</sup>, **Г.В. НОЗДРЕНКО<sup>2</sup>**, С.В. ЗЫКОВ<sup>3</sup>, О. ЧИМЭД<sup>4</sup>, П.А. ЩИННИКОВ<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: aborush@ngs.ru

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор.

<sup>3</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант. E-mail: zykovc@gmail.com

<sup>4</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант. E-mail: chimed.mn@mail.ru

<sup>5</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: tes.nstu@gmail.com

В данной статье приводится краткое описание методики оценки эффективности тепловых электростанций с теплофикационными энергоблоками. Представленная методика основана на дифференциально-эксергетическом методе, который применительно к энергоблокам ТЭЦ преследует две цели: учет степени термодинамического совершенства рабочих процессов и определение путей увеличения экономии топлива, уменьшение электроэнергии на собственные нужды и затрат на реализацию и функционирование. Это позволяет оценить все необходимые для анализа характеристики энергоблока, его энергетических систем и агрегатов на основе общей, логически последовательной методики. Рассматриваются технико-экономические показатели режимов работы ТЭЦ, такие как эксергетические КПД энергоблока по отпуску электроэнергии и теплоэнергии, технико-экономическая эксергоэффективность, удельные затраты на отпускаемые электроэнергию и теплоэнергию. Эти показатели позволяют расширить традиционный технико-экономический анализ режимов работы ТЭЦ, поскольку учитывают термодинамически строгое распределение топливных затрат между теплоэнергией и электроэнергией при их комплексном производстве на ТЭЦ. Также в работе представлены оценки показателей режимов работы энергоблоков и в целом ТЭЦ при эксергетическом анализе. В качестве результатов и иллюстрации разработанной методики приведены численные значения технико-экономических показателей для разных энергоблоков. Вначале проведен анализ показателей для ТЭЦ с двумя теплофикационными энергоблоками Т-180/210. Далее представлены результаты эксергетического анализа Улан-Баторской ТЭЦ-4, в состав которой входит три энергоблока на базе турбины Т-110 и три энергоблока на базе турбины ПТ-80. По результатам анализа можно судить об эффективности работы энергоблоков и ТЭЦ в целом, а также выполнить прогнозную оценку эффективности, например, при изменении стоимости топлива.

**Ключевые слова:** эксергия, анализ, теплофикация, эффективность, методика, энергоблок, эксергоэффективность, топливо, затраты, турбина, регенерация, режим работы, подсистема

DOI: 10.17212/1814-1196-2014-4-175-184

### ВВЕДЕНИЕ

Технико-экономическая эффективность работы ТЭЦ характеризуется расходами теплоэнергии на выработку электроэнергии, выработкой электроэнергии на внешнем теплопотреблении, теплофикационной выработкой электроэнергии, удельными расходами топлива по от-

---

\* Статья получена 10 июля 2014.

Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития НГТУ.

пуску тепло- и электроэнергии и их себестоимостью [1–4]. При этом разделение топливных затрат производится на основе «физического» метода [1] и является в известной степени условным, что затрудняет оценку эффективности работы ТЭЦ.

Таким образом, актуальна разработка методических положений и методики, позволяющей расширить традиционный технико-экономический анализ [1] и получить дополнительные объективные показатели работы ТЭЦ на различных режимах.

## 1. МЕТОДИКА

Так как ТЭЦ является двухцелевым энергокомплексом, технико-экономический анализ строится на базе эксергетической методологии [2–6], которая учитывает термодинамически строгое распределение топливных затрат между теплоэксергией и электроэнергией при их комплексном производстве на ТЭЦ.

Эксергетические КПД энергоблока по отпуску электроэнергии и теплоэксергии (с технологическим паром и сетевой водой) оцениваются по методике [2–16]:

$$\eta_{4N} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \varepsilon_S \varepsilon_N ; \quad (1)$$

$$\eta_{6T} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_6 \varepsilon_S \varepsilon_N , \quad (2)$$

где  $\varepsilon_S$ ,  $\varepsilon_N$  – структурный коэффициент эксергетических связей, учитывающий взаимосвязи между подсистемами энергоблока; эксергетический коэффициент внутрициклового возврата потерь теплоты в турбоагрегате;  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\eta_3$ ,  $\eta_4$ ,  $\eta_5$ ,  $\eta_6$  – эксергетические КПД соответственно парогенератора со всеми вспомогательными энергетическими системами (топливоподачей и топливоподготовкой, очисткой дымовых газов, ГЗУ и пр.) и эксергетической производительностью  $E_1$ ; ЧВД паровой турбины с эксергетической производительностью  $E_2$ ; ЧСНД турбины с производительностью  $E_3$ ; электрической части с производительностью  $E_4$ ; системы технического водоснабжения и регенерации питательной воды с эксергетической производительностью  $E_5$ ; сетевой установки с производительностью  $E_6$ .

Предложено технико-экономическую эксергоэффективность ТЭЦ [2–6, 15, 16] оценивать по показателю

$$\Theta_{\text{ТЭЦ}} = \frac{\sum (\Pi_N N + \Pi_E E_T)}{0,123 \sum \Pi_B 10^{-3} (N / \eta_{4N} + E_T / \eta_{6T})} > 1, \quad (3)$$

где  $\Pi_B$ ,  $\Pi_N$ ,  $\Pi_E$  – цена условного топлива, руб/т у.т., цена (для ТЭЦ) отпускаемых электроэнергии ( $N$ ) и теплоэксергии ( $E_T$ ), руб/(кВт·ч).

При этом технико-экономическая эксергоэффективность энергоблока по отпуску электроэнергии и теплоэксергии

$$\Theta_N = \frac{\Pi_N \cdot N}{0,123 \Pi_B 10^{-3} N / \eta_{4N}} > 1, \quad (4)$$

$$\Theta_E = \frac{\Pi_E \cdot E_T}{0,123 \Pi_B 10^{-3} E_T / \eta_{6T}} > 1. \quad (5)$$

Технико-экономическая эксергоэффективность энергоблока в целом

$$\Theta_i = \frac{(\Pi_N \cdot N + \Pi_E \cdot E_T)}{0,123 \Pi_B 10^{-3} (N / \eta_{4N} + E_T / \eta_{6T})} > 1. \quad (6)$$

Соотношение  $\Pi_E/\Pi_N$  для энергоблока может быть оценено по [2–5] на основе дифференциального эксергетического подхода с использованием функции Лагранжа:

$$\begin{aligned}
 L = & 0,123\Pi_T \cdot 10^{-3} E_0 + \lambda_0 \left( \sum_{j=1} F_{0j} E_{0j} \eta_j^{-1} - E_0 \right) + \lambda_1 \left( \sum_{j=2,3} F_{1j} E_{1j} \eta_j^{-1} - E_1 \right) + \\
 & + \lambda_2 \left( \sum_{j=1,4,5} F_{2j} E_{2j} \eta_j^{-1} - E_2 \right) + \lambda_3 \left( \sum_{j=1,4,5,6} F_{3j} E_{3j} \eta_j^{-1} - E_3 \right) + \\
 & + \lambda_4 \left( \sum_{j=1,5,6} F_{4j} E_{4j} \eta_j^{-1} + N - E_4 \right) + \lambda_5 \left( \sum_{j=1} F_{5j} E_{5j} \eta_j^{-1} - E_5 \right) + \\
 & + \lambda_6 \left( \sum_{j=5} F_{6j} E_{6j} \eta_j^{-1} + E_T - E_6 \right) + \sum_{j=0}^6 3_j \left( E_j^y \right)_{\eta_j}, \quad (7)
 \end{aligned}$$

где  $F_{ij} = \frac{\eta_j E_{ij}^x}{E_j^y}$ ,  $3_j$  – затраты в подсистемах.

Из решения системы уравнений  $L'_0 = (\partial L / \partial E_0), \dots, L'_6 = (\partial L / \partial E_6)$  получим удельные затраты на отпускаемую электроэнергию и теплоэксергию:

$$\lambda_4 = \eta_{4N}^{-1} \left[ 0,123\Pi_T \cdot 10^{-3} + F_{01}^{-1} \left( \sum_{i=0}^5 3'_i F_{i1} + \sum_{i=0}^4 3'_i \eta_i \prod_{j=i} F_{ij} \eta_i^{-1} \right) \right] + \eta_4^{-1} \sum_{i=2}^4 3'_i F_{i4}; \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 \lambda_6 = & \eta_{6T}^{-1} \left[ 0,123\Pi_T \cdot 10^{-3} + F_{01}^{-1} \left( \sum_{i=0}^5 3'_i F_{i1} + \sum_{i=0}^4 3'_i \eta_i \prod_{j=i} F_{ij} \eta_i^{-1} \right) \right] \times \\
 & \times (F_{46} + \eta_2 \eta_4 \varepsilon_N F_{36}) + (\eta_4 \eta_6)^{-1} F_{46} \sum_{i=2}^4 3'_i F_{i4} + \eta_6^{-1} 3'_6 (F_{36} + \eta_6). \quad (9)
 \end{aligned}$$

В этих выражениях  $3'_i = (\partial 3_i / \partial E_i)$ .

Из (8), (9) найдем

$$\Pi_E / \Pi_N \approx \lambda_6 / \lambda_4. \quad (10)$$

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве иллюстрации разработанной методики приведены значения технико-экономических показателей режима работы ТЭЦ с двумя теплофикационными энергоблоками Т-180/210.

Электрическая нагрузка ТЭЦ составляет 383 МВт, тепловая нагрузка – 376 МВт. При этом первый энергоблок (Т<sub>1</sub>-180/210) работает с электрической нагрузкой 180 МВт и тепловой

нагрузкой 228 МВт, а второй (Т<sub>2</sub>-180/210) – с электрической нагрузкой 203 МВт и тепловой – 148 МВт. Эксергетический КПД по отпуску электроэнергии  $\eta_{4N}$  первого энергоблока 0,439 и второго энергоблока 0,398. Эксергетическая производительность сетевых установок 31 МВт и 20 МВт, а эксергетические КПД  $\eta_{6T}$  по отпуску теплоэксергии составляют 0,287 и 0,258.

Технико-экономическая эксергоэффективность энергоблоков составила  $\Theta_1 = 1,52$ ;  $\Theta_2 = 1,34$  и в целом по ТЭЦ  $\Theta_{ТЭЦ} = 1,42$ . При этом технико-экономическая эксергоэффективность энергоблоков по отпуску электроэнергии и теплоэксергии  $\Theta_{N1} = 1,43$ ;  $\Theta_{N2} = 1,29$  и  $\Theta_{E1} = 1,86$ ;  $\Theta_{E2} = 1,68$ . Эти значения получены при стоимости отпуска электроэнергии от ТЭЦ  $C_N = 0,02$  долл/кВт·ч с учетом данных, оцененных по [17, статья АНВШ] и информации ОАО «СибКОТЭС». На основе проведенных компьютерных расчетных экспериментов для теплофикационных энергоблоков мощностью 50...250 МВт получено  $C_E/C_N \approx \lambda_6/\lambda_4 = 1,86...2,3$  (среднее значение на уровне двух). Таким образом, принята цена (для ТЭЦ)  $C_E$  отпускаемой теплоэксергии 0,04 долл/кВт·ч.

Рассмотрим эксергетические показатели режима работы и технико-экономическую эксергоэффективность Улан-Баторской ТЭЦ-4. Электрическая мощность Улан-Баторской ТЭЦ-4 (УБТЭЦ-4) при составе энергооборудования (8хБКЗ-420-140 + 3хТ-110 + 3хПТ-80) – 570 МВт, тепловая – 1050 Гкал/ч.

ТЭЦ работает на угле марки Б2 (теплота сгорания угля 13...15 МДж/кг), поставляемом с шахт Баганур и Шивэ-Ово. Содержание серы в угле не превышает 0,6 %. Также котлоагрегаты могут работать на мазуте марки М-40 с потреблением мазута 25 т/ч. Он используются при расщепочном режиме работы котла. Уголь хранится на открытом складе емкостью 240 000 т. Так как УБТЭЦ-4 имеет схему с поперечными связями (рис. 1), при эксергетическом анализе рассматриваются эквивалентные энергоблоки с эквивалентными котлами паропроизводительностью соответственно 485 т/ч для Т-110 и 470 т/ч (для ПТ-80). Для эквивалентного теплофикационного энергоблока определяются расходно-термодинамические параметры и эксергетическая эффективность. Эквивалентный энергоблок рассматривается как основной источник электроэнергии и теплоэксергии.

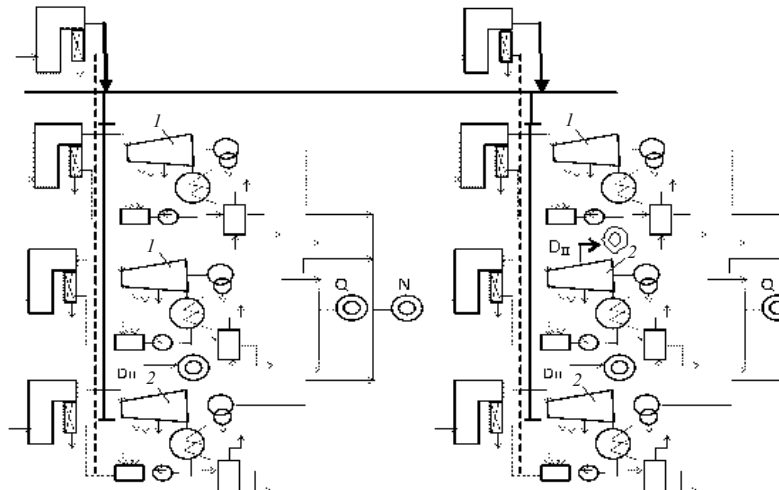


Рис. 1. Принципиальная схема Улан-Баторской ТЭЦ-4:

$Q, N$  – тепло- и электроэнергия;  $D_{II}$  – пар промышленного отбора; 1 – турбина Т-110; 2 – турбина ПТ-80

Электрическая нагрузка ТЭЦ на рассматриваемом режиме (при отключенном из-за отсутствия в настоящее время технологических потребителей П-отборе) составляет 470 МВт,

тепловая нагрузка – 620 МВт. При этом первый энергоблок (Т<sub>1</sub>-110) работает с электрической нагрузкой 77 МВт и тепловой нагрузкой 136 МВт, второй (Т<sub>2</sub>-110) – с нагрузками 78 МВт и 138 МВт, третий (Т<sub>3</sub>-110) – с нагрузками 75 МВт и 132 МВт, четвертый (ПТ<sub>4</sub>-80) и пятый (ПТ<sub>5</sub>-80) – с электрической нагрузкой 80 МВт и тепловой нагрузкой 78 МВт, шестой (ПТ<sub>6</sub>-80) – с электрической нагрузкой 80 МВт и тепловой нагрузкой 58 МВт.

В таблице приведены основные эксергетические показатели режима работы УБТЭЦ-4.

**Основные эксергетические показатели режима работы УБТЭЦ-4**

Показатели	Т-110			ПТ-80			ТЭЦ
	1	2	3	4	5	6	
$N$ , МВт	77	78	75	80	80	80	470
$Q$ , МВт	136	138	132	78	78	58	620
$\eta_1$	0,549	0,552	0,552	0,556	0,556	0,552	0,552
$\eta_2$	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96
$\eta_3$	0,98	0,98	0,97	0,95	0,95	0,93	
$\eta_5$	0,376	0,380	0,401	0,515	0,515	0,556	0,47
$\eta_6$	0,76	0,75	0,75	0,73	0,73	0,73	0,74
$\eta_{4N}$	0,427	0,429	0,427	0,417	0,417	0,409	0,420
$\eta_{6T}$	0,323	0,324	0,322	0,304	0,304	0,298	0,315

Теплоэксергетическая производительность котлов составляет для Т-110 134...143 МВт и для ПТ-80 133...137 МВт, а эксергетические КПД  $\eta_1$  соответственно 0,549...0,552 и 0,552...0,556. Отметим, что энергобаланс котла [18] учитывает только химическую энергию подводимого топлива, теплопроизводительность котла и нормативные потери, которые обычно находятся на уровне 10 %, в то время как эксергетический КПД наряду с нормативными учитывает потери от неравновесного процесса горения топлива и неравновесного процесса теплообмена при генерировании пара, а приводная эксергия [2, 3] котла учитывает как химическую энергию топлива, так и теплоэксергию питательной воды и электроэнергию на собственные нужды котла.

Эксергетические производительности ЧВД и ЧСНД энергоблоков составляют 130...139 МВт и 90...95 МВт для Т-110, для ПТ-80 – 130...133 МВт и 85...89 МВт, а эксергетические КПД  $\eta_{2,3}$  0,93...0,98. По энергобалансу турбины ее энергопроизводительность равна механической работе, передаваемой электрогенератору, а внутренний относительный КПД учитывает потери проточной части, которые составляют 10...12 %. При эксергетическом анализе эксергопроизводительность турбины включает не только механическую работу, передаваемую по валу электрогенератору, но и теплоэксергию, передаваемую из отборов турбины подсистеме регенерации и сетевой установке. Теплоэксергетическая производительность подсистемы регенерации и технического водоснабжения 11...18 МВт при эксергетических КПД  $\eta_5$  0,376...0,556. Эксергетическая производительность сетевой установки 9,7...24,0 МВт, а

эксергетические КПД  $\eta_6$  0,73...0,76. Работа подсистемы регенерации характеризуется эксергетическими потерями на уровне 45...60 % и обусловлена технологическими ограничениями по количеству подогревателей (не более восьми), что и вызывает повышенные потери от неравновесного процесса теплообмена при регенерации. При работе сетевой установки эксергетические потери практически являются только потерями от неравновесного процесса теплообмена при обеспечении температур сетевой воды согласно температурному графику.

Эксергетический КПД по отпуску электроэнергии  $\eta_{4N}$  оценивается на уровне 0,409...0,429, а для ТЭЦ – 0,420. При этом эксергетические КПД  $\eta_{6T}$  по отпуску теплоэнергии составляют 0,298...0,324, что обусловлено включением в технологическую линию теплоэнергетического производства сетевой установки и приводит в конечном итоге к КПД ТЭЦ 0,315.

По данным УБТЭЦ-4 [19, 20] с учетом [17] и ОАО «СибКОТЭС» стоимость отпуска электроэнергии от Т-110  $C_N = 0,01$  долл/кВт·ч, от ПТ-80  $C_N = 0,012$  долл/кВт·ч. При  $C_E/C_N \approx \lambda_6/\lambda_4 = 2$  цена отпускаемой теплоэнергии от Т-110 составит  $C_E = 0,02$  долл/кВт·ч, от ПТ-80  $C_E = 0,024$  долл/кВт·ч.

На рис. 2 приведены значения технико-экономической эксергоэффективности УБТЭЦ-4.

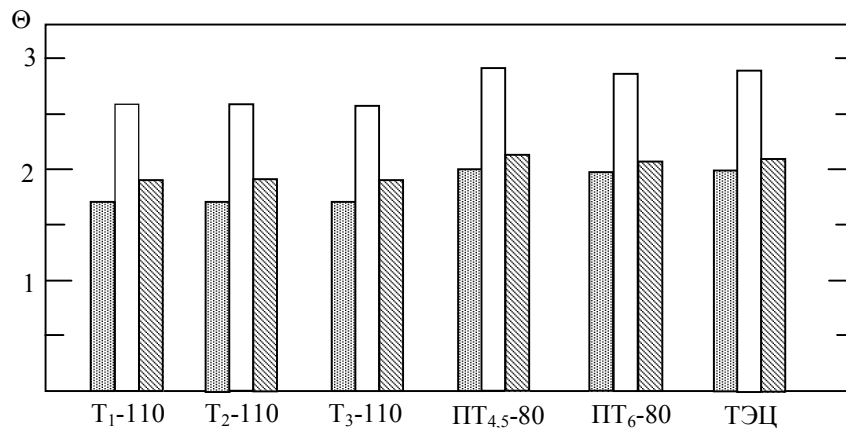


Рис. 2. Показатели технико-экономической эксергоэффективности работы УБТЭЦ-4:

■, □, ▨ –  $\Theta_N$ ,  $\Theta_E$ ,  $\Theta$  – технико-экономическая эксергоэффективность по отпуску электроэнергии, теплоэнергии и в целом энергоблоков и ТЭЦ

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложены технико-экономические показатели режимов работы ТЭЦ, учитывающие термодинамически строгое распределение топливных затрат между теплоэнергией и электроэнергией при их комплексном производстве на ТЭЦ.

2. Разработана методика оценки показателей режимов работы энергоблоков и в целом ТЭЦ при эксергетическом анализе на базе дифференциального эксергетического подхода.

3. Приведены численные значения этих показателей для энергоблоков и ТЭЦ и результаты эксергетического анализа УБТЭЦ-4.

4. Из представленных в работе данных видно, что эксергоэффективность Улан-Баторской ТЭЦ-4 по отпуску электроэнергии находится на уровне 1,9, а по отпуску теплоэнергии – 2,65, что обусловлено потреблением дешевого Баганурского и Шивэ-Овонского угля. При увеличении стоимости угля даже в 1,5 раза и неизменной цене отпуска электроэнергии и теплоэнергии работа УБТЭЦ будет технико-экономически эффективна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 34.08.552–95. Методические указания по составлению отчёта электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования. – Утверждены Министерством топлива и энергетики Российской Федерации 24.11.1995: введ. в действие 01.02.1996. – М.: ОРГРЭС, 1995. – 122 с.
2. Ноздренко Г.В., Щинников П.А. Комплексный эксергетический анализ энергоблоков ТЭС с новыми технологиями. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 190 с. – (Серия «Монографии НГТУ»).
3. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями / П.А. Щинников, Г.В. Ноздренко, В.Г. Томилов, Ю.В. Овчинников, А.А. Ловцов, П.Ю. Коваленко, Н.Г. Зыкова, О.А. Вихман, И.В. Бородихин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 528 с. – (Серия «Монографии НГТУ»).
4. *Nosdrenko G., Schtschinnikow P.* Exergieanalyse der thermischen kraftwerke mit neuen technologien. – Hannover: Europäischen Wissenschaftliche Gesellschaft, 2013. – 160 p.
5. Техничко-экономические показатели новой технологии комбинированного энергоснабжения с ПГУ и термо-трансформаторами / Г.В. Ноздренко, О.К. Григорьева, А.А. Францева, Ф.А. Серант, В.Г. Томилов, Ю.В. Овчинников // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2012. – № 1 (18). – С. 112–115.
6. Техничко-экономический КПД энергоблоков ТЭЦ / Г.В. Ноздренко, П.А. Щинников, О.К. Григорьева, О.В. Боруш // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2013. – № 6. – С. 16–24.
7. Ноздренко Г.В., Щинников П.А., Бородихин И.В. Определяющие принципы и алгоритмы вычислительного комплекса ОРТЭС для проведения технико-экономических исследований ТЭС с новыми энерготехнологиями // Энергосистемы, электростанции и их агрегаты: сборник научных трудов / под ред. В.Е. Накорякова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – Вып. 9. – С. 22–42.
8. Ноздренко Г.В., Щинников П.А. Использование вычислительного комплекса ОРТЭС для технико-экономических исследований ТЭС // Научный вестник НГТУ. – 2005. – № 1 (19). – С. 51–62.
9. Basic provisions of exergy method and analysis of power plants with state-of-the-art heat pump combined cycle heating systems / V.E. Nakoryakov, G.V. Nozdrenko, P.A. Shchinnikov, O.K. Grigoryeva // Journal of Engineering Thermophysics. – 2010. – Vol. 19, iss. 2. – P. 53–61. – doi: 10.1134/S1810232810020013
10. Оценка реального расхода топлива энергоблоками ТЭЦ на основе оптимизационных расчетов их режимов работы / О.В. Боруш, С.В. Зыков, А.В. Сафронов, В.Г. Томилов, П.А. Щинников, Г.В. Ноздренко // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2013. – № 2 (21). – С. 26–33.
11. Complex technical and economic studies of combined-cycle units with flow gasifiers / V.E. Nakoryakov, G.V. Nozdrenko, P. Shchinnikov, O.V. Borush, A.G. Kuzmin // Thermal Engineering. – 2010. – Vol. 57, iss. 14. – P. 1197–1203. – doi: 10.1134/S0040601510140053.
12. Накоряков В.Е., Ноздренко Г.В., Кузьмин А.Г. Техничко-экономические показатели ПГУ ТЭЦ с газификацией угля // Научный вестник НГТУ. – 2009. – № 4 (37). – С. 155–162.
13. Prospects of application of combined-cycle plants in Siberian power engineering in consideration of energy budget / P.A. Shchinnikov, G.V. Nozdrenko, O.K. Grigoryeva, O.V. Borush // Proceedings of the Third International Forum on Strategic Technology IFOST 2008, 23–29 June, 2008, Novosibirsk-Tomsk, Russia. – Novosibirsk, 2008. – P. 561–563. – doi: 10.1109/IFOST.2008.4602961.
14. Щинников П.А. Научно-методические основы исследования энергоблоков ТЭС // Научный вестник НГТУ. – 2004. – № 3 (18). – С. 161–168.
15. Ноздренко Г.В. Алгоритм расчета показателей эффективности теплоэнергетических установок при эксергетическом анализе // Известия Сибирского отделения Академии наук СССР. Серия технических наук. – 1982. – № 3, вып. 1. – С. 127–131.
16. Ноздренко Г.В. Эксергетический анализ теплоэнергетических установок: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НЭТИ, 1985. – 56 с.
17. Сценарные условия развития электроэнергетики на период до 2030 года / Агентство по прогнозированию балансов в электроэнергетике. – М., 2011. – 204 с. – URL: [http://www.ranipool.ru/images/data/gallery/1\\_8337\\_usloviya\\_elektroenergetiki\\_na\\_period\\_do\\_2030\\_goda.pdf](http://www.ranipool.ru/images/data/gallery/1_8337_usloviya_elektroenergetiki_na_period_do_2030_goda.pdf) (дата обращения: 20.05.2014).
18. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
19. Пашка Бямбацогт. Системная эффективность технологии комбинированного теплоснабжения на основе ТЭЦ с внутриквартальными тепловыми насосами: дис. ... канд. техн. наук / Новосибир. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2011. – 125 с.
20. *Nozdrenko G.V., Pashka Byambatsogt.* Efficiency of exergy method in combined system of heat supply thermal power station with district heat pump // Proceedings of the International Conference on Knowledge Based Industry 2011, July 06–07, 2011, Mongolian University Science and Technology. – Ulaanbaatar, Mongolia, 2011. – P. 483–487.

*Боруш Олеся Владимировна*, кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – современные задачи теплоэнергетики. Имеет более 30 публикаций. E-mail: aborush@ngs.ru

*Ноздренко Геннадий Васильевич*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры тепловых электрических станций факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – системные исследования в энергетике; новые технологии ТЭС; математическое моделирование и оптимизация ТЭС; эксергетический анализ. Имеет более 200 публикаций.

*Зыков Сергей Владимирович*, аспирант кафедры тепловых электрических станций факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – теплоэнергетические установки. Имеет 6 публикаций. E-mail: zykovc@gmail.com

*Чимэд Ориуу*, аспирант кафедры тепловых электрических станций факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – эксергетический анализ режимов работы ТЭС. E-mail: chimed.mn@mail.ru

*Щинников Павел Александрович*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тепловых электрических станций факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – перспективные технологии топливоиспользования в теплоэнергетических установках, комплексный анализ функционирования энергоблоков ТЭС на основе эксергетической методологии. Имеет более 200 публикаций. E-mail: tes.nstu@gmail.com

### *Indicators of the CHPP operating mode in the exergic analysis\**

O.V. BORUSH<sup>1</sup>, G.V. NOZDRENKO<sup>2</sup>, S.V. ZYKOV<sup>3</sup>, O. CHIMED<sup>4</sup>, P.A. SHCHINNIKOV<sup>5</sup>

<sup>1</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 K, Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: aborush@ngs.ru*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 K, Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D.Sc. (Eng.), professor.*

<sup>3</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 K, Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student. E-mail: zykovc@gmail.com*

<sup>4</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 K, Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, postgraduate student. E-mail: chimed.mn@mail.ru*

<sup>5</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 K, Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D.Sc. (Eng.), professor. E-mail: tes.nstu@gmail.com*

The article describes a procedure of assessing the effectiveness of thermal power plants with thermal-clamping power units. The presented procedure is based on the differential-exergy method which when applied to the TPP power units is aimed at assessing the degree of thermodynamic efficiency of their operation, identifying ways of decreasing fuel consumption, reducing power consumption of auxiliaries and the costs of implementation and operation. This makes it possible to evaluate all characteristics necessary for the analysis of power units, their power systems and components based on a common, coherent methodology. Such performance characteristics of the CHPP operating mode as a power unit's exergic efficiency in electric power and thermal exergy delivering, exergy efficiency as well as specific costs of generated electric power and thermal exergy are analyzed. This approach can extend a traditional technical and economic analysis of the CHPP operating mode as it takes into account a thermodynamically rigorous distribution of fuel costs in a combined production of thermal exergy and electric power at the CHPP. Also, some estimates of the efficiency of the operating mode of power units and the CHPP as a whole provided by the exergy analysis are given in the paper. The values of technical and economic parameters of different power units are given as an illustration of the results and developed techniques. First, operating parameters of combined heat power plants with two T-180/210 power units are analyzed. Then the results of the exergic analysis of the Ulaanbaatar CHPP-4 operation which includes three T-110 turbine units and three PT-80 turbine units are given. Based on the analysis it is possible to estimate the efficiency of the power units and CHPP as a whole as well as to perform a predictive assessment of their efficiency, for example, when the fuel cost changes.

**Keywords:** exergy, analysis, district heating, efficiency, procedure, power unit, exergy efficiency, fuel, costs, turbine, regeneration, mode of operation, subsystem, differential

\* Received 10 July 2014.

The work is performed in the framework of the strategic development of the NSTU.



## REFERENCES

1. RD 34.08.552–95. *Metodicheskie ukazaniya po sostavleniyu otcheta elektrostantsii i aktsionernogo obshchestva energetiki i elektrifikatsii o teplovoi ekonomichnosti oborudovaniya* [Guidance Document 34.08.552–95. Procedural guidelines for writing reports of electric power generating stations and energy utility and electrification corporations on thermal efficiency of equipment]. Moscow, ORGRES Publ., 1995. 122 p.
2. Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A. *Kompleksnyi eksergeticheskii analiz energoblokov TES s novymi tekhnologiyami* [Complex exergy analysis of power units of heat power plants based on new technologies]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2009. 190 p.
3. Shchinnikov P.A., Nozdrenko G.V., Tomilov V.G., Ovchinnikov Yu.V., Lovtsov A.A., Kovalenko P.Yu., Zyko-va N.G., Vikhman O.A., Borodikhin I.V. *Kompleksnye issledovaniya TES s novymi tekhnologiyami* [Comprehensive investigations of ThPS with new technologies]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004. 528 p.
4. Nozdrenko G., Schtschinnikov P. *Exergieanalyse der thermischen kraftwerke mit neuen technologien*. Hannover, Europäischen Wissenschaftliche Gesellschaft, 2013. 160 p.
5. Nozdrenko G.V., Grigor'eva O.K., Frantseva A.A., Serant F.A., Tomilov V.G., Ovchinnikov Yu.V. *Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli novoi tekhnologii kombinirovannogo energosnabzheniya s PGU i termotransformatorami* [Techno-economic indicators new technology combined heat supply with steam gas plant and thermotransformer]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2012, № 1 (18), pp. 112–115.
6. Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A., Grigor'eva O.K., Borush O.V. *Tekhniko-ekonomicheskii KPD energoblokov TETs* [Technoeconomic efficiency of CHPP units]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika – Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2013, no. 6, pp. 16–24.
7. Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A., Borodikhin I.V. [Guiding principles and algorithms for computer system ORTES feasibility techno-economic researches TPP with new energy technologies]. *Sbornik nauchnykh trudov "Energosistemy, elektrostantsii i ikh agregaty"* [Collection of proceedings «Power Systems, power plants and units»]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2005, no. 9, pp. 22–42.
8. Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A. *Ispol'zovanie vychislitel'nogo kompleksa ORTES dlya tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniy TES* [Using computing complex ORTES for feasibility studies TPP]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2005, № 1 (19), pp. 51–62.
9. Nakoryakov V.E., Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A., Grigoryeva O.K. *Basic provisions of exergy method and analysis of power plants with state-of-the-art heat pump combined cycle heating systems*. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, vol. 19, iss. 2, pp. 53–61. doi: 10.1134/S1810232810020013
10. Borush O.V., Zykov S.V., Safronov A.V., Tomilov V.G., Shchinnikov P.A., Nozdrenko G.V. *Otsenka real'nogo raskhoda topliva energoblokami TETs na osnove optimizatsionnykh raschetov ikh rezhimov raboty* [Assessment of real fuel consumption of power units CHP based on optimization calculations of their operating modes]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2013, no. 2 (21), pp. 26–33.
11. Nakoryakov V.E., Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A., Borush O.V., Kuzmin A.G. *Complex technical and economic studies of combined-cycle units with flow gasifiers*. *Thermal Engineering*, 2010, vol. 57, iss. 14, pp. 1197–1203. doi: 10.1134/S0040601510140053
12. Nakoryakov V.E., Nozdrenko G.V., Kuz'min A.G. *Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli PGU TETs s gazifikatsiei uglia* [Integrated coal gasification combined cycle power plant technical-economic performance]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2009, no. 4 (37), pp. 155–162.
13. Shchinnikov P.A., Nozdrenko G.V., Grigoryeva O.K., Borush O.V. *Prospects of application of combined-cycle plants in Siberian power engineering in consideration of energy budge*. *Proceedings of the Third International Forum on Strategic Technology IFOST 2008*, Novosibirsk-Tomsk, Russia. Novosibirsk, 2008, pp. 561–563. doi: 10.1109/IFOST.2008.4602961
14. Shchinnikov P.A. *Nauchno-metodicheskie osnovy issledovaniya energoblokov TES* [Scientific and methodical basis of the research of power units]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2004, no. 3 (18), pp. 161–168.
15. Nozdrenko G.V. *Algoritm rascheta pokazatelei effektivnosti teploenergeticheskikh ustanovok pri eksergeticheskom analize* [Algorithm for calculating the efficiency indicators of thermal power units in exergic analysis]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Akademii nauk SSSR. Seriya tekhnicheskikh nauk – Proceedings of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. A series of technical sciences*, 1982, no. 3, iss. 1, pp. 127–131.
16. Nozdrenko G.V. *Eksergeticheskii analiz teploenergeticheskikh ustanovok* [Exergic analysis of thermal power units]. Novosibirsk, NETI Publ., 1982. 56 p.
17. *Stenarnye usloviya razvitiya elektroenergetiki na period do 2030 goda* [Scenario conditions for the development of electric power industry for the period up to 2030]. Moscow, 2011. 204 p. Available at: [http://www.ranipool.ru/images/data/gallery/1\\_8337\\_\\_usloviya\\_elektoenergetiki\\_na\\_period\\_do\\_2030\\_goda.pdf](http://www.ranipool.ru/images/data/gallery/1_8337__usloviya_elektoenergetiki_na_period_do_2030_goda.pdf) (accessed 20.05.2014)

18. *Teplovoi raschet kotlov (normativnyi metod)* [Thermal calculation boiler units (normative method)], St. Petersburg, NPO TsKTI Publ., 1998. 256 p.

19. Pashka Byambatsogt. *Sistemnaia effektivnost' tekhnologii kombinirovannogo teplosnabzheniia na osnove TETs s vnutrikvartal'nymi teplovymi nasosami*. Diss. kand. tekhn. nauk [System efficiency combined heating technology based on CHPPs with block heat pumps. PhD eng. sci. diss]. Novosibirsk, 2011. 125 p.

20. Nozdrenko G.V., Pashka Byambatsogt. Efficiency of exergy metod in combined system of heat supply thermal power station with district heat pump. Proceedings of the International Conference on Knowledge Based Industry 2011, Mongolian University Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia, July 06–07, 2011, pp. 483–487.