

УДК 621.311

## **Эксергетический анализ новых котельных технологий в составе энергоблоков ТЭС**

**Г.В. Ноздренко, П.А. Щинников, Ф.А. Серант, В.Г. Томилов,  
Н.Г. Зыкова, П.Ю. Коваленко, Е.Е. Русских**

*Новосибирский государственный технический университет*

E-mail: russkih@cotes.ru

Изложены основополагающие принципы комплексного эксергетического анализа новых котельных технологий в составе энергоблоков ТЭС. Приведены результаты анализа.

**Ключевые слова:** энергоблок, эксергия, оптимизация.

Одно из направлений развития теплоэлектростанций связано с применением новых котельных технологий (рис. 1), к которому относят котлы с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС, e), с кольцевыми топками (КЦТ, d), с системами: плазменного розжига и подсветки (ПЛАЗ, a), приготовления и сжигания композитного жидкого топлива из угля (КЖТ, b), а также термической подготовки топлива (ТЦП, c).

Эксергетический анализ, как возможный путь исследования этих технологий, обусловлен не только их востребованностью, перспективностью и технической готовностью к использованию и даже, в целом ряде случаев, реализацией на ТЭС, но и отсутствием большого опыта разработки и проектирования. В этом случае получение необходимой технико-экономической информации достигается расчетными методами на основе математического моделирования.

Цель эксергетического анализа — получение своего рода “рентгеновского снимка” или “разреза” функционирующей котельной технологии в составе энергоблока ТЭС с использованием эксергетической функции. В этой связи главной задачей разработанного эксергетического подхода является формирование и обоснование представительного состава эксергетических показателей для технико-экономического анализа и критерия эффективности с дальнейшей оценкой наиболее выгоднейших сочетаний термодинамических, расходных, конструктивных, компоновочных параметров, а также технологической схемы в условиях выполнения всех внешних и внутренних ограничений на сооружение и функционирование энергоблока [1].

Разработанный подход эксергетического анализа котельных технологий в составе энергоблоков ТЭС включает:

- декомпозицию технологической схемы (с учетом агрегирования) на несколько функциональных частей,
- математическое описание (моделирование) функционирования и использования этой модели при расчетах в вычислительном комплексе,

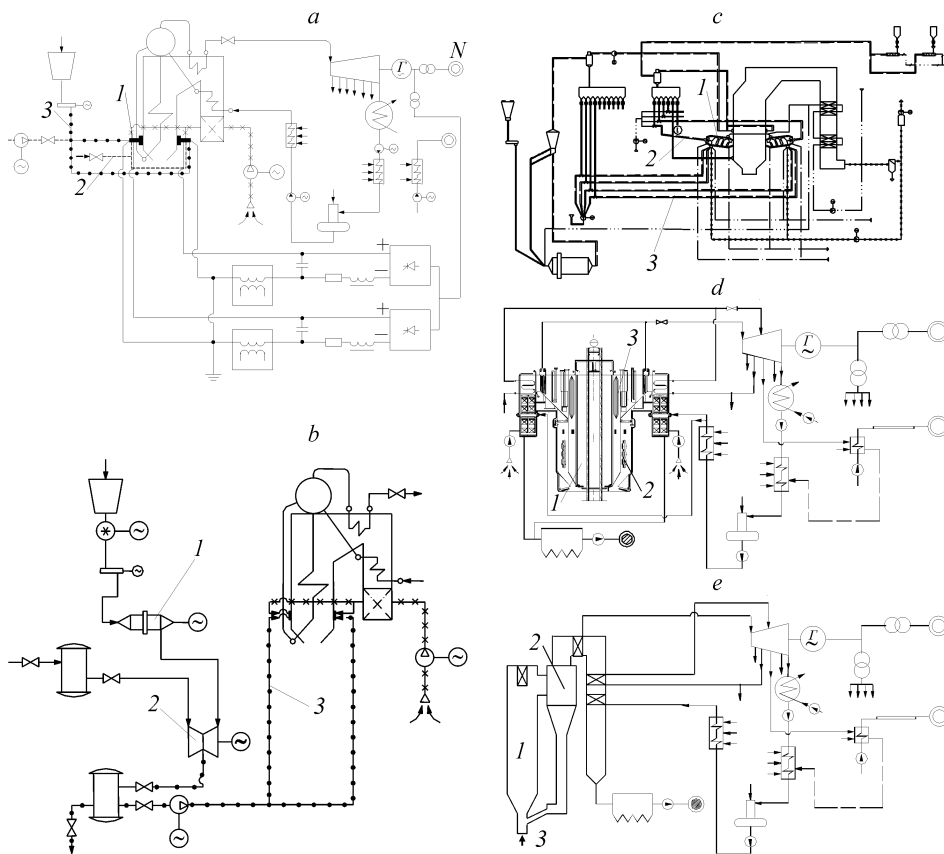


Рис. 1. Принципиальные схемы котельных технологий.

*a* — плазменного розжига и стабилизации горения угля (ПЛАЗ): 1 — горелка с плазмотроном, 2 — плазмообразующий воздух, 3 — уголь; *b* — сжигания композитного жидкого топлива из угля (КЖТ): 1 — дезинтегратор, 2 — кавитатор-диспергатор, 3 — готовое топливо; *c* — термической подготовки угля (ТЦП): 1 — термоциклонный предтопок, 2 — инициирующее топливо, 3 — рабочее топливо; *d* — кольцевой топки (КЦТ): 1 — кольцевая топка, 2 — горелки, 3 — конвективный газоход; *e* — циркулирующего кипящего слоя (ЦКС): 1 — топка, 2 — циклон, 3 — первичный воздух.

- оптимизацию параметров функционирования по условиям действия ограничивающих факторов,
- определение и анализ эксергетических показателей и технико-экономических критериев в сравниваемых вариантах.

В рассматриваемых технологиях первая функционирующая часть включает котел со всеми вспомогательными системами (топливоподдачи и топливоподготовки, очистки дымовых газов, тяги и дутья и пр.). Другие состоят из частей высокого, среднего и низкого давления турбины, электрогенератора и электрооборудования энергоблока, системы регенерации и технического водоснабжения, системы отпуска теплоэксергии.

Эксергия, произведенная  $i$ -й частью  $\sum E_{ij}^y$  с затратами  $Z_i$ , “продается” этой частью по каждому  $j$ -у каналу связи, а эксергия, полученная по какому-либо  $k$ -у каналу связи  $\sum E_{ki}^x$ , — “покупается” (рис. 2). Эксергия, полученная по  $k$ -у каналу связи, является эксергией собственных нужд, поскольку обеспечивает функционирование  $i$ -й части.

Удельные затраты на отпускаемую от котла эксергию (с перегретым паром и паром промежуточного перегрева) [1]

$$\lambda_1 = \lambda_K = \eta_K^{-1} \left[ 0,123C_T + F_{01}^{-1} \left( \sum_i \frac{\partial \mathcal{Z}_i}{\partial E_i} F_{i1} + \sum_i \frac{\partial \mathcal{Z}_i}{\partial E_i} \eta_i \prod F_{ij} \eta_i^{-1} \right) \right], \quad (1)$$

где оператор функциональных отношений определяется как отношение входящих в функциональную часть потоков эксергии к выходящим с учетом эффективности собственно функциональной части

$$F_{ij} = \eta_j \frac{E_{ij}^x}{E_j^y}, \quad (2)$$

КПД котла определяется как КПД первой функциональной части с учетом эксергетического коэффициента структуры

$$\eta_K = \eta_1 \varepsilon_S, \quad (3)$$

а эксергетический коэффициент структуры, характеризующий совершенство энергетической установки в целом, —

$$\varepsilon_S = F_{01}^{-1} \left( 1 - \eta_1^{-1} \sum \prod F_{ij} \eta_i^{-1} \right). \quad (4)$$

Для представленной схемы (см. рис. 2) функционал из выражения (1) имеет вид:

$$\begin{aligned} \sum_i \frac{\partial \mathcal{Z}_i}{\partial E_i} \eta_i \prod F_{ij} \eta_i^{-1} = & \frac{\partial \mathcal{Z}_2}{\partial E_2} \eta_2 (F_{24} \eta_2^{-1}) (F_{41} \eta_4^{-1}) + \frac{\partial \mathcal{Z}_3}{\partial E_3} \eta_3 (F_{34} \eta_3^{-1}) (F_{41} \eta_4^{-1}) + \\ & + \dots + \frac{\partial \mathcal{Z}_2}{\partial E_2} \eta_2 (F_{24} \eta_2^{-1}) (F_{46} \eta_4^{-1}) (F_{65} \eta_6^{-1}) (F_{51} \eta_5^{-1}) + \\ & + \frac{\partial \mathcal{Z}_3}{\partial E_3} \eta_3 (F_{34} \eta_3^{-1}) (F_{46} \eta_4^{-1}) (F_{65} \eta_6^{-1}) (F_{51} \eta_5^{-1}), \end{aligned} \quad (5)$$

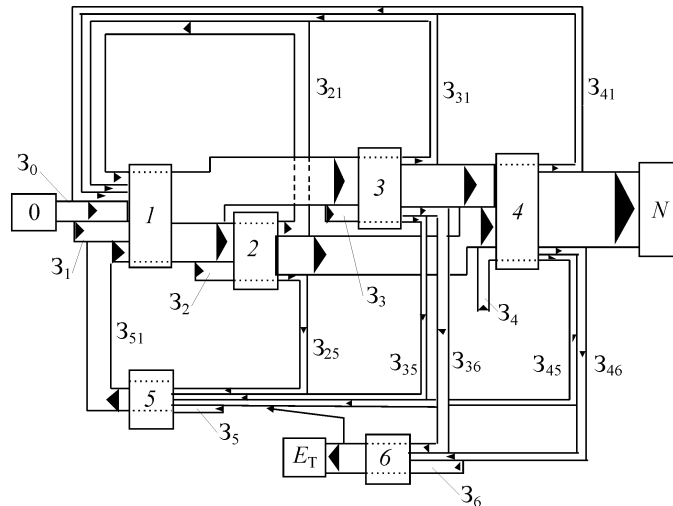


Рис. 2. Потоки эксергетических затрат при разбиении энергетической установки на шесть функционирующих частей.

0 — характеризует эксергию топлива, 1–6 — характеризует функциональные части энергоблока,  $\mathcal{Z}_{i-1-6}$  — затраты эксергии в создание функциональной части,  $\mathcal{Z}_{kj}$  — перебоки эксергии (затрат) между функциональными частями, N,  $E_T$  — потребители электроэнергии и теплоэксергии.

оператор связи топливо–первая функциональная часть —

$$F_{01} = \frac{E_{01}}{E_{01} + E_{21} + E_{31} + E_{41} + E_{51}} = E_{01} \frac{1}{(E_{12} + E_{13})1/\eta_1}, \quad (6)$$

а функционал из выражения (4) —

$$\begin{aligned} \sum \prod F_{ij} \eta_i^{-1} = & F_{21} \eta_2^{-1} + F_{31} \eta_3^{-1} + (F_{24} \eta_2^{-1})(F_{41} \eta_4^{-1}) + \\ & + \dots + (F_{34} \eta_3^{-1})(F_{46} \eta_4^{-1})(F_{65} \eta_6^{-1})(F_{51} \eta_5^{-1}). \end{aligned} \quad (7)$$

Переменную часть удельных затрат на отпускаемую от котла эксергию с достаточной точностью можно представить выражением

$$\Delta \lambda_K = \frac{0,123}{\eta_1(X) \varepsilon_S(X)} \Pi_T, \quad (8)$$

где  $X$  — совокупность параметров и показателей, характеризующих конкретную котельную технологию,  $\Pi_T$  — стоимость топлива.

Для варианта с новой котельной технологией с конструктивными и термодинамическими параметрами  $X$  по сравнению с базовым вариантом с параметрами  $X_0$

$$\frac{\eta_1}{\eta_1^0} = \frac{E_{01}^0 \left( \frac{F_{01} E_1}{F_{01}^0 E_1^0} \right)_{X^s}}{E_{01}} \cong \frac{B_0}{B}, \quad (9)$$

где  $B$  и  $B_0$  — расход топлива новой котельной технологией и базовым вариантом соответственно, а  $X^s$  выступают в качестве ограничивающих параметров входа–выхода в первую (котельную) функционирующую часть энергоблока.

В выражениях (1), (2), (6), (9) буквой  $E$  обозначена эксергия в соответствующем сечении рассматриваемого энергоблока, направляемая по какому-либо каналу связи.

В такой постановке переменную часть удельных затрат по отношению к базовому варианту можно представить как

$$\frac{\Delta \lambda_K}{\Delta \lambda_K^0} = \left( \frac{\frac{0,123}{\eta_1(X) \varepsilon_S(X)} \Pi_T}{\frac{0,123}{\eta_1^0 \varepsilon_S^0} \Pi_T} \right)_{X^s} = \left( \frac{\eta_1^0 \varepsilon_S^0}{\eta_1(X) \varepsilon_S(X)} \right)_{X^s}, \quad (10)$$

а эксергетический коэффициент структуры — как

$$\frac{\varepsilon_S}{\varepsilon_S^0} = \left( \frac{\frac{1}{F_{01}(X)} \left( 1 - \frac{1}{\eta_1(X)} \sum \prod F_{ij}(X) \frac{1}{\eta_i(X)} \right)}{\frac{1}{F_{01}^0} \left( 1 - \frac{1}{\eta_1^0} \sum \prod F_{ij} \frac{1}{\eta_i^0} \right)} \right)_{X^s}. \quad (11)$$

В выражениях (9)–(11) индекс 0 относится к базовому варианту сравнения. Следует отметить, что в качестве базового варианта удобно использовать традиционную технологию, под которой понимается факельное сжигание в топке камерного типа.

Показатель эксергетической эффективности того или иного варианта определяется выражением

$$\tilde{\eta} = \frac{S}{M_G(3)} \left[ 1 - \frac{M_G([K])}{S} (1 - E_D) \right] - \Delta\eta. \quad (12)$$

Здесь  $\Delta\eta = v\sqrt{D_G(\eta)}$ ,  $M_G, D_G$  — математическое ожидание и дисперсия случайной функции,  $G$  — множество внешних связей и исходных данных с известными законами распределения случайных компонент,  $v$  — коэффициент, характеризующий расчетный уровень достоверности,  $K$  — капиталовложения в энергоблок,  $S$  — годовой доход от реализации продукции,  $E_D$  — ставка дисконтирования,  $3$  — затраты на создание и функционирование.

Влияние  $i$ -х внешних факторов и исходных данных  $g_i \in G$  на эксергетическую эффективность оцениваются в соответствии с процедурой как

$$\frac{g}{\delta g} \left\{ \Delta\tilde{\eta}_{\min}^{-1} \left( \varphi_u(\omega) \right) \Big|_{g_i^{\text{var}} \in G} \right\} > \delta_{\eta}. \quad (13)$$

В этом выражении  $\delta$  — изменение фактора,  $\delta\eta$  — условие равноценности вариантов,  $\varphi_u(\omega)$  — вероятностный логико-числовой оператор функциональных отношений,  $\omega$  — информационная структура, учитывающая тип энергоблока, параметры и эксергетические показатели новой котельной технологии в составе энергоблоков.

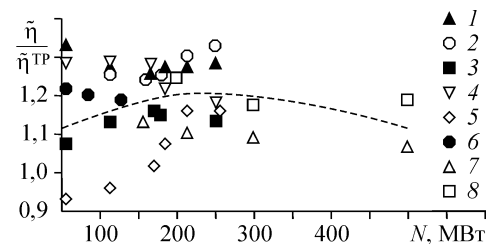
Показатель эксергетической эффективности энергоблоков с новыми котельными технологиями в 1,1–1,3 раза выше, чем у традиционных технологий (рис. 3). При этом теплофикационные энергоблоки имеют преимущество перед конденсационными. Это обусловлено более высоким влиянием комбинированного (многоцелевого) производства на показатель эксергетической эффективности по сравнению с влиянием лишь термодинамических параметров. Технологию плазменного розжига и подсветки целесообразно применять для энергоблоков мощностью 150 МВт и выше. Энергоблоки с технологией кольцевой топки эффективнее, чем с технологией циркулирующего кипящего слоя, во всем диапазоне рассмотренных мощностей. При мощностях энергоблоков до 200 МВт применение термической подготовки угля более целесообразно по сравнению с плазменным розжигом, а при мощностях свыше 200 МВт — эти технологии практически сопоставимы. Применение технологии сжигания композитного жидкого топлива из угля эффективно для теплофикационных энергоблоков.

Эксергетический КПД по отпуску теплоэксергии котельной частью энергоблоков составляет 0,39–0,44 (большие значения относятся к энергоблокам закритических параметров), то есть эксергетические потери составляют 56–61 %.

Рис. 3. Относительная эффективность энергоблоков с новыми технологиями:

$\tilde{\eta}, \tilde{\eta}^{\text{TP}}$  — эксергетический показатель эффективности исследуемого энергоблока с новой технологией и традиционного с аналогичными профилем и единичной мощностью соответственно.

Т-энергоблоки: ЦКС (1), КЦТ (2), КЖТ (3), ТЦП (4), ПЛАЗ (5), ЦКС для ПТ-турбин (6);  
К-энергоблоки: ЦКС (7), КЦТ (8).



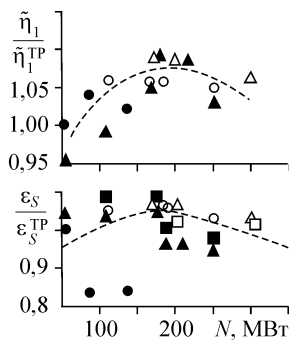


Рис. 4. Относительный эксергетический КПД котельной части и относительная структурная эффективность энергоблоков:  $\eta_1$  — КПД котельной части,  $\varepsilon_S$  — эксергетические коэффициенты структуры, верхний индекс TP — для традиционного энергоблока; обозначения те же, что и на рис. 3.

Новые котельные технологии уменьшают эти потери, что увеличивает эксергетический КПД котельной части энергоблоков в 1,05–1,1 раза (рис. 4). При этом удельные затраты на теплоэксергию уменьшаются в 1,05–1,06 раза (рис. 5).

Дальнейшее повышение эксергетической эффективности (и уменьшение потерь) котельной части может быть достигнуто следующими технологическими способами:

1. Повышением начальных параметров пара, что снижает эксергетические потери от неравновесного теплообмена;
2. Повышением давления в газоздушном тракте высоконапорного котла при последующем совершении им работы (после топки котла) в газовой турбине, что практически переводит паротурбинный цикл в парогазовый, с дальнейшим охлаждением газа в конвективной шахте котла. Такая организация снижает эксергетические потери от неравновесного теплообмена за счет увеличения средней температуры подвода тепла в цикл,
3. Комбинированием обоих способов.

Первый способ реализуется в настоящее время в энергоблоках на суперсверхкритических параметрах пара. Второй способ — в газификаторах по типу “Тексако”, в ПГУ с высоконапорными парогенератором и ЦКС-котлами.

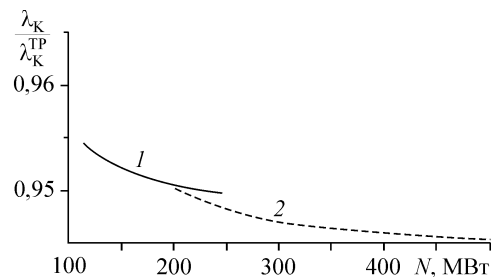
Более технологичным представляется создание высоконапорного котла с кольцевой топкой на композитном жидком топливе из угля. Выполненные оценки для Т-энергоблоков мощностью 100–250 МВт показывают, что эксергетический КПД высоконапорной котельной части может быть увеличен на 20–30 %, а мощность энергоблока по сравнению с исходной — на 30–40 %.

Важной задачей оценки технико-экономической эффективности энергоблоков с новыми котельными технологиями является определение наиболее выгодного сочетания термодинамических, расходных, конструктивных, компоновочных параметров при выполнении всех внешних и внутренних ограничений на их сооружение и функционирование.

К числу наиболее важных для котельных технологий относятся: начальные параметры пара (давление  $P_0$  и температура  $t_0$ ), температура пара промперегрева ( $t_{пп}$ ), температура питательной воды ( $t_{пв}$ ).

Задача оптимизационных исследований в общем виде может быть сформулирована следующим образом: требуется найти такой набор параметров энергоблока, определяющих его функционирование и наиболее важных для котельных технологий, при которых обеспечивается покрытие электрических и тепловых нагрузок при максимальной технико-

Рис. 5. Уменьшение удельных затрат на теплоэксергию, отпускаемую котельной, функционирующей части КЦТ-технологии по сравнению с традиционной. Для Т-энергоблоков (1), для К-энергоблоков (2).



экономической эффективности энергоблока с той или иной новой котельной технологией в условиях влияющих системных факторов и их неопределенности.

Для определения оптимальных начальных параметров пара в структуре разработанного программного комплекса для каждого варианта энергоблока предусмотрено выполнение:

- теплорасчетного и стоимостного расчета котла с той или иной новой котельной технологией, паровой турбины, системы регенерации и технического водоснабжения, расчета мощности и стоимости агрегатов собственных нужд,

- стоимостных расчетов систем топливоподачи и топливоприготовления, тяги и дутья, золошлакоудаления, эвакуации дымовых газов с системой очистки, электрической части ТЭС, отпуска тепла,

- расчетов технико-экономических параметров с учетом затрат в экологическую, промышленную и тепло- и электросистемную инфраструктуры.

Оптимизация параметров энергоблоков с новыми котельными технологиями формулируется как задача нахождения минимума [1] функции цели  $[\overline{\eta}_Z(x, y)]^{-1}$ :

$$\min_{X, Y \in R^n} \{[\overline{\eta}_Z(x, y)]^{-1} | \overline{\varphi}_n(\omega) = 0, n \in U; x, y \in R^n\}, \quad (14)$$

где  $x, y$  — независимые параметры и зависимые переменные,  $\overline{\varphi}_n(\omega)$  — вероятностный логико-числовой оператор функциональных отношений,  $U$  — множество логико-числовых операторов,  $\omega = (x, y, \Gamma, G, R^n, L_\gamma)$  — информационная структура учитывающая тип энергоблока,  $\Gamma$  — множество энергоблоков с новыми котельными технологиями,  $L_\gamma$  — множество логических параметров управляющей программы вычислительного комплекса. Интегральный технико-экономический показатель эффективности, исходя из формулы (12):

$$\overline{\eta}_Z(x, y) = M_G \left( \frac{\frac{1}{\tau_P} W}{\frac{1}{\tau_P} \sum_{\tau=0}^{\tau_P} (1+E)^{-\tau} 3_{j\tau}^0 \prod a_\alpha \prod b_\varepsilon^{n_\varepsilon}} + 1 \right) - v \sqrt{D_G}, \quad (15)$$

где  $W$  — интегральные результаты, определяемые тарифами и отпускной электроэнергией и теплоэнергией при функционировании энергоблока,  $M_G, D_G$  — математическое ожидание и дисперсия случайной функции,  $G$  — множество внешних связей и исходных данных с известными законами распределения случайных компонент,  $v$  — коэффициент, характеризующий расчетный уровень достоверности результатов вычислений,  $\tau$  — расчетный год,  $E$  — ставка дисконта,  $3_{j\tau}^0$  — базовое значение затрат (капиталовложений в агрегаты и вспомогательное оборудование, в резервные и замещающие установки, в технические системы и т. п.),  $a_\alpha$  — коэффициенты приведения по параметрам и показателям, учитывающим конструктивные особенности, особенности функционирования и компоновки,  $b_\varepsilon$  — относительные параметры, определяющие отклонения затрат от базового значения,  $\alpha, \varepsilon$  — влияющие факторы (термодинамические, конструктивные, компоновочные параметры, вид тепловой схемы, тип оборудования, вид топлива, климатический район функционирования, фоновые концентрации вредных веществ и т. д.),  $n_\varepsilon$  — показатели степени.

Логико-числовой оператор  $\bar{\varphi}_n(\omega)$  определяется структурой и содержанием программно-вычислительного комплекса. Основой являются разработанные теоретические положения для исследования энергетических и эксергетических балансов тепловых электростанций, оптимизация их схем, параметров и характеристик, технико-экономической эффективности в реальных условиях работы энергосистемы при обеспечении надежности, экологичности, параметров инфраструктуры с учетом взаимосвязей термодинамических, технологических и экономических факторов. Разработанный оператор  $\bar{\varphi}_n(\omega)$  ориентирован на технико-экономические расчеты и оптимизацию энергоблоков с новыми котельными технологиями. Множество  $G$  исходных данных характеризует внешние связи (топливные, режимные, технологические, инфраструктурные, экологические и экономические), конструктивно-компоновочные, прочностные, теплогидравлические ограничения.

Для оптимизации  $[\bar{\eta}_Z(x, y)]^{-1}$  используется метод Растригина (случайного поиска) с мультистартом [1].

Уравнения для котла (с новыми технологиями) и его внешних связей имеют вид:

– энергобаланса

$$BQ_i^P = \sum_{k \in V(i)} (\eta M^x h)_{ki} - \sum_{j \in W(i)} (\eta M^y h)_{ij} = 0, \quad (3)$$

– расходного баланса

$$B + \sum_{k \in V(i)} M^x_{ki} - \sum_{j \in W(i)} M^y_{ij} = 0, \quad (4)$$

– эксергетического баланса

$$\sum_{k \in V(i)} E_{ki}^x - \sum_{j \in W(i)} E_{ij}^y h_i^{-1} = 0. \quad (5)$$

Здесь  $B$  — расход топлива,  $M, h$  — расход и энтальпия энергоносителя,  $\eta$  — коэффициент, учитывающий соответствующие потери энергии (или эксергии).

Для каждого энергоносителя записываются уравнения вида

$$\Delta y_{k,j} = \Delta y_{k,j}(X), \quad (6)$$

где  $\Delta y$  — изменения давления, энтальпии, эксергии, скорости, температуры соответственно.

Для каждой  $q$ -й поверхности нагрева, выполненной из  $m$ -й котельной стали, формируется зависимость

$$y_{q,m} = y_{q,m}(X), \quad (7)$$

характеризующая наибольшую температуру стенки, толщину стенки труб, расход металла.

На параметры зависимостей (6), (7) накладываются ограничения, отражающие технологические и требования к надежности.

Параметры  $X$  могут изменяться лишь в пределах физически возможных и технически (технологически) осуществимых значений



$$X^* \leq X \leq X^{**}, \quad (8)$$

где индексы \*, \*\* относятся к минимально и максимально допустимым значениям параметров.

Влияние факторов  $g_i^{\text{var}} \in G$  на целевую функцию оценивалось при проведении вычислительных экспериментов согласно процедуре

$$\frac{\delta}{\delta g_i} \{ \bar{\eta}_{\min}^{-1} | \bar{\varphi}_n(\omega) | g_i^{\text{var}} \in G \} > \delta_z, \quad (9)$$

где  $\delta$  — изменение фактора,  $\delta_z$  — технико-экономическое условие равноценности вариантов.

Технико-экономическая устойчивость оптимальных решений при изменении  $g_i^{\text{var}} \in G$  проверялась по условию

$$\left( \frac{\delta x_1}{\delta g_i} \leq \varepsilon_{x_1}, \dots, \frac{\delta x_n}{\delta g_i} \leq \varepsilon_{x_n} \right) \forall \{ \bar{\eta}_{\min}^{-1} | (\bar{\varphi}_n(\omega) | g_i^{\text{var}} \in G) \}, \quad (10)$$

где  $\delta x_n$  — изменение  $x_n \in X$ ,  $\delta g_i$  — изменение  $i$ -о фактора,  $\varepsilon_{x_n}$  — условие технико-экономической равноценности оптимальных решений.

На рис. 6 представлены оптимальные параметры для проектируемых энергоблоков ТЭЦ мощностью до 250 МВт с новыми котельными технологиями.

Из этих данных видно, что оптимальные параметры находятся в зоне хорошо освоенных, традиционных и реализованных на энергоблоках значений. Расчеты показали, что рассмотренные новые котельные технологии эффективно могут использоваться (и уже применяются [1]) и при модернизации функционирующих традиционных энергоблоков без изменения их параметров.

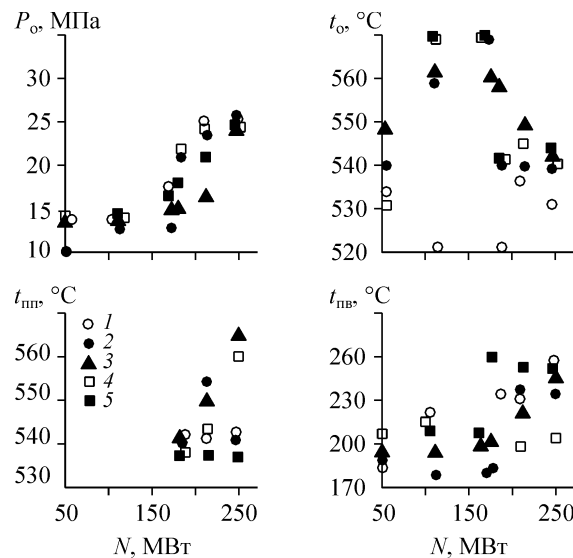


Рис. 6. Оптимальные параметры энергоблоков ТЭЦ с новыми котельными технологиями.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методика эксергетического анализа как методика получения “рентгеновского снимка” котельной технологии в составе энергоблока, сформулирован и обоснован состав эксергетических показателей.

2. Выполнен комплексный эксергетический анализ новых котельных технологий и показано, что по сравнению с традиционными они позволяют увеличить эксергетическую эффективность котельной части в 1,05–1,1 раза и уменьшить удельные затраты на отпускаемую теплоэнергию в 1,045–0,06 раза.

3. Ввод новых котельных технологий в состав энергоблоков практически не меняет их эксергетическую структуру, а показатель эксергетической эффективности в этом случае в 1,1–1,3 раза выше по сравнению с традиционными энергоблоками. При этом теплофикационные энергоблоки эффективнее конденсационных.

4. Повысить эксергетическую эффективность котельной части на 20–30 % можно путем применения высоконапорного котла (в частности, с кольцевой топкой).

5. Рассмотрена методика оптимизации параметров энергоблоков ТЭЦ с новыми котельными технологиями.

6. Показано, что устойчивые оптимальные решения находятся в зоне хорошо освоенных и близких к традиционным, что позволяет использовать новые котельные технологии как для вновь проектируемых, так и для реконструированных энергоблоков ТЭЦ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щинников П.А., Ноздренко Г.В., Томилов В.Г. и др. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. — 528 с.
2. Серант Ф.А., Змейков В.Н. и др. Исследование кольцевых топок и разработка профиля котла для мощных энергоблоков // Теплоэнергетика. — 1982. — № 10. — С. 33–36.
3. Ноздренко Г.В., Русских Е.Е. Эффективность применения на ТЭС энергоблоков с котлами циркулирующего кипящего слоя // Известия РАН. Энергетика. — 2007. — № 4. — С. 113–129.

*Статья поступила в редакцию 27 июня 2008 г.*