УДК 620.9

ТЕРМОЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАК ИНСТРУМЕНТ ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

THERMOECONOMIC ANALYSIS AS A TOOL FOR SELECTING EQUIPMENT AND OPTIMIZING THERMAL POWER PLANT PARAMETERS

Воробьев Никита Евгеньевич
аспирант высшей школы атомной и тепловой энергетики,
Санкт-Петербургский политехнический университет
им. Петра Великого
vorobiev.ne@edu.spbstu.ru

Куколев Максим Игоревич
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
профессор высшей школы атомной и тепловой энергетики,
Санкт-Петербургский политехнический университет
им. Петра Великого
maksim.kukolev@spbstu.ru

Аннотация. В статье рассматривается термоэкономический анализ – интегральный метод, объединяющий термодинамические и экономические критерии оценки эффективности тепловых электростанций (ТЭС). Показаны ключевые преимущества подхода, основные расчетные показатели и сферы применения при проектировании и эксплуатации энергообъектов.

Ключевые слова: термоэкономический анализ, эксергия, оптимизация параметров, тепловые электростанции, приведенные затраты, энергоэффективность.

Vorobyev Nikita Evgenievich
Postgraduate Student at the Higher School of Nuclear and Thermal Power Engineering, Peter the Great
St. Petersburg Polytechnic University
vorobiev.ne@edu.spbstu.ru

Kukolev Maxim Igorevich
Doctor of Engineering Sciences,
Senior Researcher,
Professor at the Higher School of Atomic and Thermal Energy,
Peter the Great
St. Petersburg Polytechnic University
maksim.kukolev@spbstu.ru

Annotation. The article examines thermoeconomic analysis – an integrative method that combines thermodynamic and economic criteria for evaluating the efficiency of thermal power plants (TPPs). The key advantages of the approach, main calculation indicators, and application areas in the design and operation of energy facilities are demonstrated.

Keywords: thermoeconomic analysis, exergy, optimization of parameters, power plants, levelized costs, energy efficiency.

1. Сущность термоэкономического анализа

Термоэкономический анализ (эксергоэкономика) – метод, позволяющий комплексно оценить эффективность энергетических установок через призму эксергии (технической работоспособности потока энергии) и экономических затрат [1, 2]. В отличие от чисто термодинамического анализа, он учитывает:

– капитальные вложения (K);
– эксплуатационные расходы (C);
– стоимость топлива и материалов;
– амортизацию и ремонты.

Основной показатель – приведенные затраты З, рассчитываемые по формуле:

$$З = E_н \cdot K + C, \quad (1)$$

где $E_н$ – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; $C = m \cdot K + \sum S_{эн} + S_0$ – эксплуатационные затраты (m – коэффициент отчислений, $S_{эн}$ – затраты на энергию и сырье, S_0 – прочие расходы) [3, 4].

2. Задачи и области применения

Термоэкономический анализ решает ряд ключевых задач:

– технико-экономическая оптимизация параметров установок и их элементов;
– распределение затрат топлива и энергии между продуктами в комплексных производствах;
– обоснование норм удельного расхода энергии и материалов;
– оптимальное проектирование теплообменных сетей (в том числе с использованием пинч-технологии) [5];
– оценка качества и прогнозирование изменения характеристик оборудования.

На практике метод применяется при:
– выборе типа и мощности оборудования (котлы, турбины, теплообменники);
– оптимизации температурных и давленческих режимов;
– анализе эффективности рекуперативных систем (котлы-утилизаторы, тепловые насосы) [6].

3. Методологические подходы

Выделяют два основных варианта термоэкономического анализа:

а) без детального исследования преобразования эксергии внутри системы – сравнение вариантов на основе материальных и энергетических балансов (расчет эксергии только для входных и выходных потоков) [1].

б) с учетом внутренних преобразований эксергии – анализ образования стоимости промежуточных и выходных потоков, что позволяет выявить «узкие места» и причины роста затрат [2,7].

В обоих случаях критерием оптимизации выступает *минимизация стоимости единицы эксергии выходных потоков C*:

$$C = \min\left(\sum_{i=1}^{N} C_{ei} \cdot E_i + \sum_{j=1}^{M} K_j\right), \quad (2)$$

где C_{ei} – стоимость единицы эксергии потока, E_i – эксергия потока, K_j – капитальные затраты [3].

4. Преимущества и ограничения

Преимущества:
– учет как энергетических, так и экономических факторов [1,2];
– возможность сравнения разнотипного оборудования на единой методологической основе [4];
– выявление резервов снижения затрат за счет оптимизации эксергетических потоков [6].

Ограничения:
– трудоемкость сбора и обработки данных;
– зависимость результатов от точности стоимостных оценок и нормативных коэффициентов [3, 7];
– необходимость детальной модели материальных и энергетических потоков.

5. Примеры применения и перспективы

Термоэкономический анализ активно используется при модернизации ТЭС, например:
– оптимизация тепловых схем парогазовых установок (ПГУ) [8];
– выбор параметров котлов-утилизаторов и сетевых подогревателей [9];
– оценка эффективности систем теплофикации [10].

Перспективы связаны с интеграцией метода в цифровые платформы проектирования и эксплуатации энергообъектов, а также с учетом экологических факторов (выбросы, утилизация отходов) [5, 8].

Заключение

Термоэкономический анализ – эффективный инструмент выбора оборудования и оптимизации параметров ТЭС. Он позволяет находить компромисс между термодинамической эффективностью и экономическими затратами, повышая конкурентоспособность энергообъектов в условиях ограниченных ресурсов и растущих требований к энергоэффективности.

Список литературы:

1. Цацаронис Г. Термоэкономический анализ и оптимизация энергетических систем // Прогресс в энергетике и науке о горении. – 1993. – Т. 19. – Вып. 3. – С. 227–257.
2. Эксергоэкономический анализ тепловых систем / А. Валеро [и др.] // Энергетика. – 1992. – Т. 17. – № 11. – С. 915–928.
3. Серра Л.М. Оптимизация Exergoeconómica de Sistemas Termicos : докторская диссертация. – Университет Сарагосы, 1995.
4. Лозано М.А. Теория эксергетических затрат: основы и приложения / М.А. Лозано, А. Валеро // Международный журнал термодинамики. – 2020. – Т. 23. – № 2. – С. 55–64.
5. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения / П.А. Щинников [и др.] // Проблемы региональной энергетики. – 2017. – № 3(35). – С. 25–32.
6. Сафронов П.Г. Управление повышения эффективности работы ТЭЦ / П.Г. Сафронов, Д.Н. Пименов // Молодой учёный. – 2020. – № 44(334). – С. 15–18.
7. Бежан А. Тепловое проектирование и оптимизация / А. Бежан, Г. Цацаронис, М. Моран. – Джон Вили и сыновья, 1996. – 542 с.
8. Девянин А.В. Оптимизация параметров тепловых схем конденсационных и теплофикационных ПГУ / А.В. Девянин, С.В. Цанев, В.Д. Буров // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – № 1. – С. 23–27.
9. Котас Т.Дж. Эксергетический метод анализа тепловых установок. – Баттервортс, 1985. – 297 с.

10. Основы эксергетического анализа топливно-энергетических установок / Э.Э. Шпильрайн [и др.]. – М. : Энергия, 1978. – 280 с.

List of references:

1. Tsatsaronis G. Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems // Progress in Energy and Combustion Science. – 1993. – Vol. 19. – Iss. 3. – P. 227–257.
2. Exergoeconomic analysis of thermal systems / A. Valero [et al.] // Energy. 1992. Vol. 17. – № 11. – P. 915–928.
3. Serra L.M. Optimization of thermal systems exergoeconómica : doctoral dissertation. University of Zaragoza, 1995;
4. Lozano M.A. Exergy Cost Theory: Fundamentals and Applications / M.A. Lozano, A. Valero // International Journal of Thermodynamics. – 2020. – Vol. 23. – № 2. – P. 55–64.
5. Improving the Efficiency of District Heating and Heat Supply Systems / P.A. Shchinnikov [et al.] // Problems of Regional Energy. – 2017. – № 3(35). – P. 25–32.
6. Safronov P.G. Managing the Efficiency of Combined Heat and Power Plants / P.G. Safronov, D.N. Pimenov // Young Scientist. – 2020. – № 44 (334). – P. 15–18.
7. Bejan A. Thermal Design and Optimization / A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran. – John Wiley & Sons, 1996. – 542 p.
8. Devyanin A.V. Optimization of Thermal Scheme Parameters for Condensing and Combined Heat and Power Plants / A.V. Devyanin, S.V. Tsanev, V.D. Burov // Energy Saving and Water Treatment. – 2009. – № 1. – P. 23–27.
9. Kotas T.J. Exergy Method for Analysis of Thermal Plants. – Butterworth, 1985. – 297 p.
10. Fundamentals of Exergy Analysis of Fuel and Power Plants / E.E. Shpilrain [et al.]. – M. : Energy, 1978. – 280 p.