

## **МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ РАБОТЫ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ**

**Гаврилова А.А., Салов А.Г., Сагитова Л.А.**

*Российская Федерация, г. Самара,  
Самарский государственный технический университет*

**Аннотация.** В работе предложена методика сравнительной оценки эффективности работы котельного оборудования с применением метода многокритериального оценивания DEA (Data Envelopment Analysis). Сформирован обобщенный критерий экономичности функционирования котла, включающий в себя коэффициент полезного действия, удельные расходы топлива и электроэнергии. На примере работы котла ТП-170 проиллюстрировано использование данной методики. Методика позволяет оценивать эффективность работы котлов при работе на разных производительностях, определять мероприятия по повышению экономичности оборудования, принимать математически обоснованные решения при выборе наиболее экономичных котлов и распределении общей нагрузки котельной и использовать имеющееся оборудование максимально эффективно.

**Ключевые слова:** DEA методология, экономичность, котлоагрегат, многокритериальное оценивание, энергоэффективность.

Энергетическая отрасль оказывает ключевое влияние на развитие промышленности и обеспечивает качество жизни населения.

В результате перехода к рыночной экономике в работе энергетических систем произошло резкое уменьшение числа промышленных потребителей энергии, что привело к изменению соотношения между постоянной в течение года выработкой пара для промышленных потребителей и сезонной выработкой горячей воды на отопление. Произошедшие изменения привели к работе оборудования в нерасчетных режимах с пониженными показателями эффективности [1-5].

Для повышения эффективности производства тепловой энергии котельными одной из приоритетных задач является определение эффективных режимов работы котельных агрегатов с учетом их фактического состояния и оптимальное распределение нагрузки между ними.

Как правило, при распределении нагрузки руководствуются принципом минимального объема расхода топлива (при работе всех котлов на одинаковом топливе) или минимальных затрат (при работе котлов на топливе с различной стоимостью).

В данной работе был предложен новый подход оценивания экономичности работы котлов, учитывающий помимо расхода топлива другие критерии работы оборудования.

Для проведения многокритериального оценивания эффективности работы котлов использовалась методология многокритериального оценивания DEA или «Анализ среды функционирования», позволяющая провести сравнительную оценку котлов [6-7]. Она позволяет проводить сравнительный анализ деятельности сложных технических, экономических и социальных систем. Её основными преимуществами является то, что она не требует предварительных знаний о взаимодействиях между переменными или о функциональной форме, позволяет определить эффективность одного или нескольких объектов относительно других и выявить направления улучшения работы неэффективных объектов.

Интегральный показатель сравнительной эффективности  $f$  возрастает при увеличении выходных величин  $Y_k$  и уменьшении входных величин  $X_m$ . В качестве входов и выходов принимают различные характеристики деятельности объектов.

В общем случае оцениваемый объект характеризуется величиной обобщенного показателя эффективности  $f_n$ :

$$f_n = \max_{u_m, v_j \in G} \frac{u_{1n} \cdot Y_{1n} + u_{2n} \cdot Y_{2n} + \dots + u_{kn} \cdot Y_{kn}}{v_{1n} \cdot X_{1n} + v_{2n} \cdot X_{2n} + \dots + v_{mn} \cdot X_{mn}}$$

при наличии ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{u_{1n} \cdot Y_{11} + u_{2n} \cdot Y_{21} + \dots + u_{kn} \cdot Y_{k1}}{v_{1n} \cdot X_{11} + v_{2n} \cdot X_{21} + \dots + v_{mn} \cdot X_{m1}} \leq 1, \\ \frac{u_{1n} \cdot Y_{12} + u_{2n} \cdot Y_{22} + \dots + u_{kn} \cdot Y_{k2}}{v_{1n} \cdot X_{12} + v_{2n} \cdot X_{22} + \dots + v_{mn} \cdot X_{m2}} \leq 1, \\ \dots \dots \dots \\ \frac{u_{1n} \cdot Y_{1N} + u_{2n} \cdot Y_{2N} + \dots + u_{kn} \cdot Y_{kN}}{v_{1n} \cdot X_{1N} + v_{2n} \cdot X_{2N} + \dots + v_{mn} \cdot X_{mN}} \leq 1, \end{array} \right.$$

где  $u_{in}$  и  $v_{jn}$  – неотрицательные весовые коэффициенты,  $i = \{1, 2, \dots, k\}$ ;  $j = \{1, 2, \dots, m\}$ .

Поскольку в данной работе не учитывалась возможность переменного эффекта масштаба, то в используемой модели не требуется ограничения, согласно которому сумма весовых коэффициентов должна быть равна единице.

В качестве объекта исследования рассматривался энергетический котел №1 ТП-170 Новокуйбышевской ТЭЦ-1, входящей в состав ПАО «Т ПЛЮС».

Работа котельных агрегатов оценивается более чем 50 показателями, из которых были выбраны в качестве основных следующие три:

- 1)  $X_1$  – удельный расход топлива;
- 2)  $X_2$  – удельный расход электроэнергии на тягу и дутье;
- 3)  $Y_1$  – коэффициент полезного действия (КПД).

Сформируем обобщенный критерий экономичности работы котла в виде функционала [8-11]:

$$f_{\text{экон.}} = \max_{u_{jn}, v_{jn} \in G} \frac{u_{1n} \cdot Y_{1n}}{v_{1n} \cdot X_{1n} + v_{2n} \cdot X_{2n}}, n = 1, 2, \dots, N,$$

где  $N$  – количество состояний объекта,

$u_{in}$  и  $v_{jn}$  – неотрицательные весовые коэффициенты.

Система ограничений, определяющая область весовых коэффициентов  $G$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{u_{11} \cdot Y_{11}}{v_{11} \cdot X_{11} + v_{21} \cdot X_{21}} \leq 1, \\ \frac{u_{12} \cdot Y_{12}}{v_{12} \cdot X_{12} + v_{22} \cdot X_{22}} \leq 1, \\ \dots \\ \frac{u_{1n} \cdot Y_{1n}}{v_{1n} \cdot X_{1n} + v_{2n} \cdot X_{2n}} \leq 1, \end{array} \right.$$

На рисунке 1 графически отображены результаты расчета обобщенного критерия экономичности  $f_{экон}$ , а в таблице 1 приведены численные результаты расчетов.

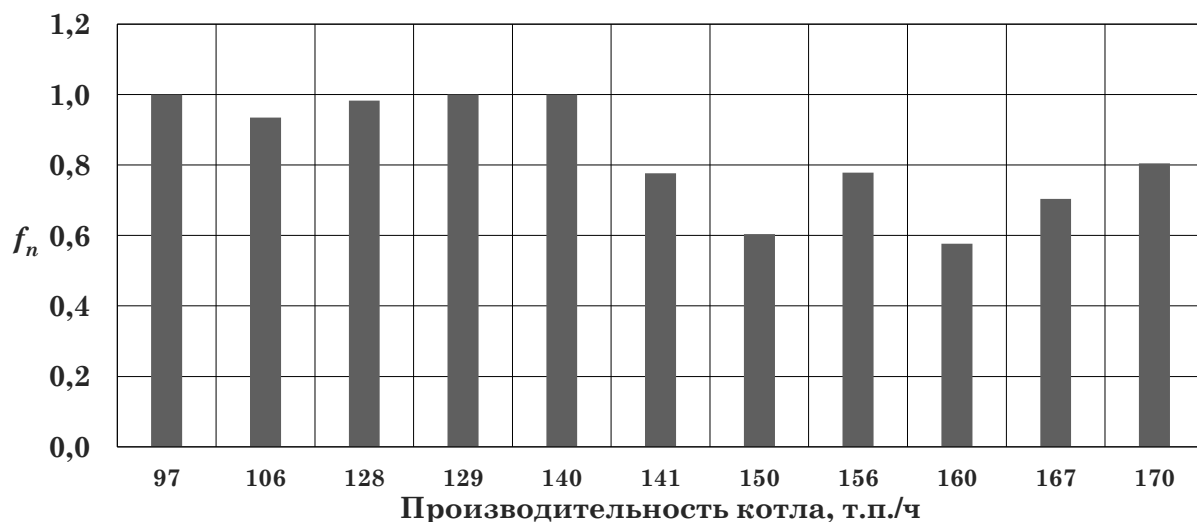


Рисунок 1. Значения обобщенного критерия экономичности котла  $f_{экон}$

Анализ показывает, что значения критерия  $f_{экон}$  находятся в интервале от 0,58 до 1. Режимы, при которых  $f_{экон} > 0,75$ , считаются эффективными и образуют границу эффективности, за которой расположены менее экономичные режимы работы котлов.

Режимы работы котлов с высокими значениями обобщенного критерия экономичности характеризуются высоким КПД  $Y_1$ , низким удельным расходом топлива  $X_1$  и низким удельным расходом электроэнергии на собственные нужды  $X_2$ .

Максимальные значения критерия  $f_{экон}$  соответствуют режимам работы котла при производительностях, равных 97, 129 и 140 т.п./ч. При

этом анализ весовых коэффициентов показывает, что наибольшее влияние на величину критерия экономичности при данных производительностях оказывают  $X_1$  и  $X_2$ . При этом ни одна из максимальных производительностей котла не удовлетворяет одновременно условию минимальных входных и выходных характеристик.

**Таблица 1. Результаты расчетов обобщенного критерия экономичности работы котла при разных нагрузках**

№	Приведенная нагрузка котла $D_{пр}$ , т.п./ч	Весовые коэффициенты			Обобщенный критерий экономичности $f_{экон}$
		$u_1$	$v_1$	$v_2$	
1	97	0,150	1,804	1,196	1,00
2	106	0,109	0,794	2,357	0,93
3	128	0,109	0,794	2,357	0,98
4	129	0,109	0,794	2,357	1,00
5	140	0,524	4,187	1,869	1,00
6	141	0,068	0,495	1,471	0,78
7	150	0,138	1,642	1,157	0,60
8	156	0,109	0,794	2,357	0,78
9	160	0,138	1,642	1,157	0,58
10	167	0,109	0,794	2,357	0,70
11	170	0,032	0,000	1,771	0,76

Режимы работы котла с производительностями 106 и 128 т.п./ч имеют значения критерия экономичности, близкие к единице. Они характеризуются высоким  $Y_1$ , низким  $X_2$ , но обладают неоправданно высоким удельным расходом топлива,  $X_1$ .

При производительности котла 150 и 160 т.п./ч, значения сравнительной экономичности являются минимальными. Несмотря на достаточно высокие значения КПД, данные режимы имеют слишком большие расходы топлива и электроэнергии.

Согласно полученным результатам, наиболее экономичными для данного котла являются нагрузки на интервале от 97 до 140 т.п./час.

Поскольку в котельной работают котлы с различными характеристиками, то при распределении общей нагрузки котельной по котельным агрегатам можно руководствоваться результатами расчета обобщенного критерия экономичности для каждого котла и выбирать наиболее оптимальные и экономичные режимы работы.

Анализ весовых коэффициентов показал, что наибольшее влияние на значения  $f_{экон}$  оказали удельный расход топлива со значениями весовых коэффициентов от 0,495 до 4,187 и удельный расход электроэнергии на тягу и дутье ( $v_{2n} = 1,157 \div 2,357$ ). При этом значения весовых коэффициентов  $u_{In} = 0,068 \div 0,524$  имели меньшие значения, что свидетельствует о том, что КПД оказывал незначительное влияние на обобщенный критерий экономичности.

Таким образом, можно сформулировать следующие направления повышения экономичности его работы:

- снижение удельного расхода электроэнергии на тягу и дутье;
- снижение удельного расхода газа.

Для уменьшения удельного расхода электроэнергии на тягу и дутье можно рекомендовать проведение следующего комплекса мероприятий: изменение параметров работы насосов и вентиляторов, использование гидромфты или частотно-регулируемого привода на блоках питательных и подпиточных насосов, внедрение более совершенной системы автоматизации и управления технологическим процессом [12-14].

Для понижения удельного расхода газа котлом можно рекомендовать провести усовершенствование горелочных устройств, устранение неплотностей в обшивке котла и газоходов.

DEA методика позволяет проводить многокритериальную оценку эффективности работы котлов при работе на разных производительностях, принимать математически обоснованные решения при выборе оптимальных режимов работы и использовать имеющееся оборудование максимально эффективно. Кроме обобщенного критерия экономичности существует возможность формировать обобщенные критерии технологичности и экологичности работы котлов, а также глобальный крите-

рий эффективности, учитывающий все частные критерии [4]. Полученные данные можно использовать для разработки комплекса мероприятий, необходимых для улучшения работы оборудования.

### **Список литературы**

1. Гаврилова А.А., Салов А.Г., Системная методология анализа и моделирования энергоэффективности генерирующих компаний. (монография) Самара: Самар. гос. техн. ун-т; Научно-технический центр, 2021. – 277 с. ISBN 978-5-98229-485-2

2. Гаврилова А.А., Салов А.Г., Чиркова Ю.В. Оптимизация структур управления энергетическими предприятиями на основе обобщенного критерия оценки их эффективности функционирования / В сб.: Пром-Инжиниринг. Труды III межд. науч.-техн. конференции. 2017. С. 397-402.

3. Посашков М.В., Салов А.Г., Немченко В.И. Реинжиниринг структуры управления газораспределительной организации // Науч.-экон. журнал «Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом». – 2014 - №1.

4. Построение и идентификация математических моделей производственных систем: Учебное пособие / Н.В. Дилигенский, А.А. Гаврилова, М.В. Цапенко. – Самара: ООО «Офорт». 126 с.

5. Салов А.Г., Сагитова Л.А. Системный анализ надежности централизованного теплоснабжения города Самары // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2019. № 2 (62). С. 77-87.

6. Banker R.D., Charnes A, Cooper W.W. Some Models for Estimating Technical and Scale Efficiency in Data Envelopment Analysis // Omega, The International Journal of Management Science, Vol. 30, No. 9, 1984, p. 1078-1092.

7. Charnes A., Cooper W. W., Lewin A. Y. and Seiford L. M. The DEA Process, Usages and Interpretations Data Envelopment Analysis: Theory, methodology and applications. – Kluwer Academic Publishers, Boston, 1994 p. 425-435.

8. Салов А.Г., Гаврилова А.А., Чиркова Ю.В., Сагитова Л.А. Обобщенная оценка сравнительной эффективности работы котельного оборудования // Градостроительство и архитектура. 2016. № 2 (23). С. 140-146.

9. Gavrilova A. A., Salov A. G., Sagitova L.A. Assessment of the Efficiency of the Samara Region's Energy Complex Under Changing Conditions // В сб.: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. 2020. С. 9271116.

10. A. Gavrilova, A. Salov and L. Sagitova. System Analysis of the Effectiveness of Regional Energy System Management in the Conditions of

Transformation // В сб.: Proceedings - 2019 21st International Conference "Complex Systems: Control and Modeling Problems", CSCMP 2019. 2019. С. 736-741.

11. Сагитова Л.А. Обобщенная оценка работы энергетического оборудования по комплексным критериям // В сб.: Россия молодая. Сб. мат. VII Всеросс. науч.-практ. конф. молодых ученых с международным участием. 2015. С. 122.

12. Салов А.Г., Гаврилова А.А., Гаврилова Ю.В., Кухарева А.В. Многокритериальное оценивание эффективности функционирования котельного оборудования тепловых электрических станций / Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2011. № 3 (31). С. 201-207.

13. Гаврилова А.А., Салов А.Г., Денисова И.Ю., Соловьев А.И. Многокритериальное оценивание системной эффективности управления энергетическим предприятием на примере КТЭЦ-2. / Международный научно-исследовательский журнал Международный научно-исследовательский журнал.- 2021. - №6 (108).

14. Салов А.Г., Гаврилова Ю.В., Кухарева А.В. Многокритериальное оценивание эффективности функционирования котельного оборудования тепловых электрических станций // Вестник Самарского государственного технического университета. 2011. Серия «Технические науки». – 2011. – №3(31). – С.201-207.

15. Сагитова Л.А. Алгоритм системы поддержки принятия решений о повышении эффективности регионального энергетического комплекса // Инфокоммуникационные технологии. 2021. Т. 19. № 2. С. 256-262.

## MULTI-CRITERIA EVALUATION OF THE ECONOMY OPERATION OF BOILER UNITS

A.A. Gavrilova, A.G. Salov, L.A. Sagitova

*Samara State Technical University,  
Samara, Russian Federation*

**Abstract.** The paper proposes a method for multi-criteria evaluation of the efficiency of boiler equipment using the multi-criteria evaluation method DEA (Data Envelopment Analysis). A generalized criterion for the efficiency of the operation of the boiler has been formed, which includes the efficiency factor, specific fuel and electricity consumption. An example of the use of this method is given on the example of the operation of the boiler TP-170. The method makes it possible to carry out a multi-criteria assessment of the efficiency of boilers when operating at different boiler performance, to determine measures to improve the efficiency of equipment, to make mathematically sound decisions when choosing the most economical boilers and distributing the total load of the boiler house, and to use the available equipment as efficiently as possible.

**Keywords:** DEA methodology, economy, boiler unit, multi-criteria assessment, energy efficiency.