

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЮ В ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМАХ ТИПОВЫХ ЗДАНИЙ

Гаврилова А.А., Сагитова Л.А., Чичев И.С.

СамГТУ, г. Самара

Аннотация

Повышение энергоэффективности существующих объектов капитального строительства является важной и актуальной задачей. Для повышения эффективности эксплуатации жилых многоквартирных домов был проведен анализ существующих мероприятий по энерго-и ресурсосбережению, предложена совокупность частных критериев эффективности энергосберегающих мероприятий для инженерных систем зданий, определены значения экономии при их проведении для четырех типов домов. Предложена методика оценки сравнительной эффективности проведения энергосберегающих мероприятий с применением метода многокритериального оценивания DEA (Анализ среды функционирования). Сформулированы комплексные критерии эффективности для анализа мероприятий для систем отопления, водоснабжения и электроснабжения. Использование DEA методика позволяет оптимизировать выбор приоритетных направлений по проведению мероприятий по ресурсосбережению для всех типов зданий.

Ключевые слова: энергоэффективность, DEA методика, обобщенный критерий эффективности, многокритериальная оценка.

MULTI-CRITERIA EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF RESOURCE-SAVING MEASURES IN THE ENGINEERING SYSTEMS OF STANDARD BUILDINGS

Anna Gavrilova, Lyajsan Sagitova, Ilya Chichev

Samara State Technical University, Samara

Abstract

Improving the energy efficiency of existing capital construction projects is an important and urgent task. To improve the efficiency of operation of residential apartment buildings, an analysis of existing measures for energy and resource saving was carried out, a set of particular criteria for the effectiveness of energy-saving measures for engineering systems of buildings was proposed, and the values of savings during their implementation for four types of houses were determined. A method for assessing the comparative effectiveness of energy-saving measures using the DEA multi-criteria assessment method (Data Envelopment Analysis) is proposed. Comprehensive performance criteria are formulated for the analysis of measures for heating, water supply and electricity supply systems. The use of the DEA methodology makes it possible to optimize the choice of priority areas for the implementation of resource saving measures for all types of buildings.

Keywords: energy efficiency, DEA methodology, generalized efficiency criterion, multi-criteria assessment.

Энергоэффективность и энергосбережение согласно Указа Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. №899 является одним из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации. На сегодняшний день значительная часть существующего жилищного фонда не отвечает требованиям



энергоэффективности, в следствие чего затраты жителей многоквартирных домов на услуги жилищного-коммунального хозяйства (ЖКХ) и на эксплуатацию могут быть неоправданно высокими. Таким образом цель данного исследования, заключающаяся в проведении анализа направлений по ресурсосбережению и повышению эффективности домов, а также долгосрочном планировании таких мероприятий, является актуальной.

В данном исследовании для решения поставленных задач были использованы методы системного анализа, статистического анализа, методология Data Envelopment Analysis (DEA).

Комфорт и качество жизни жителей многоквартирных домов во многом обеспечивается работой различных инженерных коммуникаций: систем отопления, газоснабжения, водоснабжения, канализации, электроснабжения и т.д.

Анализ направлений повышения энергоэффективности позволит значительно снизить потребление энергоресурсов, сократить расходы жителей и управляющей компании на их оплату. Для снабжающих организаций, в свою очередь снижается износ генерирующего и сетевого оборудования, увеличивая срок службы и надежность.

Анализ усредненных значений затрат жителей на услуги ЖКХ показал, что наиболее затратными ресурсами для потребителей в настоящее время являются следующие: тепловая энергия (47,5%), вода (28,1%) и электричество (14,3%). Из существующего разнообразия энергосберегающих мероприятий было выделено 9 наиболее эффективных и низкозатратных, объединенных в 3 группы для систем отопления, водоснабжения и электроснабжения:

- замена ограждающих конструкций;
- утепление крыш, стен, фундамента;
- остекление балкона;
- установка инфракрасных датчиков;
- использование автоматических смесителей;
- использование аэраторов;
- установка датчиков движения;
- замена ламп накаливания;
- установка общедомовых приборов учета электроэнергии.

Сравнительный анализ энергосберегающих мероприятий проводился для четырех типовых многоэтажных многоквартирных зданий:

- монолитный,
- кирпичный,
- панельный
- кирпично-монолитный.

В табл. 1 приведены значения объемов сэкономленных ресурсов при проведении каждого из выбранных энергосберегающих мероприятий для всех 4 типов домов.

При проведении ресурсосберегающих мероприятий важно определить их очередность и целесообразность для конкретного типа здания.

Для оценки эффективности проведения мероприятий, а также выбора приоритетных направлений, в работе была использована методология Data Envelopment Analysis (DEA), позволяющая провести сравнительную оценку котлов. 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.



Таблица 1

Значения экономии ресурсов при проведении энергосберегающих ресурсов

Наименование энергосберегающего мероприятия	Объемы сэкономленных ресурсов			
	1 тип	2 тип	3 тип	4 тип
Отопление				
Ограждающие конструкции, Гкал/год	0,26	0,55	0,5	0,35
Утепление стен, крыш, фундамента, Гкал/год	1,4	1	1,6	1,2
Остекление балкона, Гкал/год	3,2	4,8	2,4	5,6
Электроснабжение				
Установка инфракрасных датчиков, м ³	2,99	2,85	2,28	2,43
Использование автоматических смесителей, м ³	4,73	6,34	4,12	5,14
Использование аэраторов, м ³	2,37	3,17	0,84	2,58
Водоснабжение				
Установка датчика движения, кВт·ч/год	360	330	180	210
Замена ламп накаливания, кВт·ч/год	51,84	51,84	51,84	51,84
Установка общедомовых приборов учета электроэнергии, кВт·ч/год	105,6	120	100	96

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 :

$$f_n = \max_{u_{in}, v_{jn} \in G} \frac{u_{1n} \cdot Y_{1n} + u_{2n} \cdot Y_{2n} + \dots + u_{kn} \cdot Y_{kn}}{v_{1n} \cdot X_{1n} + v_{2n} \cdot X_{2n} + \dots + v_{mn} \cdot X_{mn}} \quad (1)$$

при наличии ограничений:

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

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

Данный подход применяется для анализа эффективности промышленных производств и производственных процессов объектов энергетики, транспорта, сельского хозяйства, здравоохранения, финансовых организаций. Методология DEA характеризуется минимальной субъективностью при формировании интегральных оценок эффективности, мнение исследователя влияет только на первоначальный выбор совокупности локальных критериев, которая уточняется по мере решения задачи математического программирования.



На основе DEA методологии для каждой группы критериев сформированы комплексные критерии эффективности систем отопления, водоснабжения и электроснабжения.

Для проведения многокритериальной оценки сравнительной эффективности энергосберегающих мероприятий систем жизнеобеспечения в общем виде сформирован комплексный обобщенный показатель эффективности представлен в виде суммы частных критериев:

$$f_n = \max_{u_{in}, v_{jn} \in G} (u_{1n} \cdot Y_{1n} + u_{2n} \cdot Y_{2n} + u_{3n} \cdot Y_{3n}) \quad (3)$$

при наличии ограничений:

$$\begin{cases} u_{1n} \cdot Y_{11} + u_{2n} \cdot Y_{21} + u_{3n} \cdot Y_{31} \leq 1, \\ u_{1n} \cdot Y_{12} + u_{2n} \cdot Y_{22} + u_{3n} \cdot Y_{32} \leq 1, \\ u_{1n} \cdot Y_{13} + u_{2n} \cdot Y_{23} + u_{3n} \cdot Y_{33} \leq 1, \\ u_{1n} \cdot Y_{14} + u_{2n} \cdot Y_{24} + u_{3n} \cdot Y_{34} \leq 1, \end{cases} \quad (4)$$

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

Y_{in} – значения экономии ресурсов при проведении энергосберегающих мероприятий.

Для систем отопления:

Y_{1n}^m – экономия тепловой энергии при замене ограждающих конструкций, Гкал/год;

Y_{2n}^m – экономия тепловой энергии при утеплении стен, крыши, фундамента, Гкал/год

Y_{3n}^m – экономия тепловой энергии при остеклении балкона, Гкал/год

Для систем водоснабжения:

Y_{1n}^e – экономия воды при установке инфракрасных датчиков м³;

Y_{2n}^e – экономия воды при использовании автоматических смесителей м³;

Y_{3n}^e – экономия воды при использовании аэраторов м³.

Для систем электроснабжения:

$Y_{1n}^э$ – экономия электроэнергии при установке датчиков движения, кВт/год;

$Y_{2n}^э$ – экономия электроэнергии при замене ламп накаливания, кВт/год;

$Y_{3n}^э$ – экономия электроэнергии при установке общедомовых приборов учета электроэнергии, кВт/год.

В табл. 2 представлены результаты расчета обобщенного критерия эффективности проведения мероприятий по экономии тепловой энергии для каждого типа домов и весовые коэффициенты:

Таблица 2

Результаты расчета обобщенного критерия эффективности и весовые коэффициенты для систем отопления

Наименование показателя	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	
Весовые коэффициенты	u_{1n}^T	0,000	0,775	0,779	0,606
	u_{2n}^T	0,526	0,287	0,308	0,307
	u_{3n}^T	0,066	0,060	0,049	0,075
Обобщенный критерий f_n^T	0,95	1,00	1,00	1,00	

По результатам расчетов выявлена следующая последовательность мероприятий для максимальной энергоэффективности. Для второго, третьего и четвертого типов



зданий первоочередным мероприятием является замена ограждающих конструкций, после которого следует провести утепление фундамента, стен, крыш. Остекление балкона является малоэффективным мероприятием для этих типов зданий. Для первого типа домов замена ограждающих конструкций не влияет на комплексную эффективность, в первую очередь необходимо произвести утепление крыш, стен и фундамента, а затем остекление балконов.

Результаты расчета весовых коэффициентов и обобщенного критерия эффективности для мероприятий по экономии водных ресурсов для каждого типа домов показаны в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета обобщенного критерия эффективности и весовые коэффициенты для систем водоснабжения

Наименование показателя		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
Весовые коэффициенты	$u^{B_{1n}}$	0,294	0,000	0,294	0,294
	$u^{B_{2n}}$	0,000	0,045	0,026	0,000
	$u^{B_{3n}}$	0,051	0,226	0,000	0,051
Обобщенный критерий f_n^B		1,00	1,00	0,78	0,85

Из анализа полученных результатов видно, что наиболее эффективным и приоритетным направлением для первого, третьего и четвертого типов зданий является установка инфракрасных датчиков, далее для 1-го и 4-го типов домов вторым по эффективности направлением является установка аэраторов. Использование автоматических смесителей для данных типов зданий не влияет на комплексную эффективность. Вторым этапом по эффективности для 3-го типа зданий является установка автоматических смесителей, однако установка аэраторов для данного типа зданий не является эффективной. Для 2-го типа зданий наиболее рационально на первом этапе ресурсосберегающих мероприятий произвести установку аэраторов, а на втором – установить автоматические смесители.

Для мероприятий по экономии электрической энергии для каждого типа зданий результаты расчетов обобщенного критерия эффективности и весовые коэффициенты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета обобщенного критерия эффективности и весовые коэффициенты для систем электроснабжения

Наименование показателя		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
Весовые коэффициенты	$u^{Э_{1n}}$	0,003	0,001	0,000	0,000
	$u^{Э_{2n}}$	0,000	0,013	0,019	0,019
	$u^{Э_{3n}}$	0,001	0,001	0,000	0,000
Обобщенный критерий $f_n^Э$		1,00	1,00	1,00	1,00

Анализ полученных результатов показал, что в системах электроснабжения для 2-ого, 3-го и 4-го типов зданий наиболее эффективным мероприятием по экономии электрической энергии является замена ламп накаливания. Установка общедомовых приборов учета электроэнергии является не эффективным мероприятием для третьего и четвертого типов зданий. Также для 2-го типа зданий после замены ламп накаливания наиболее рационально проводить установку общедомовых приборов учета, а затем



установку датчиков движения. Для первого типа зданий следует начинать проведение энергосберегающих мероприятий с установки датчиков движения, затем установки общедомовых приборов учета электроэнергии и замены ламп накаливания.

Выводы

1. Предложена совокупность частных критериев эффективности энергосберегающих мероприятий для инженерных систем зданий.
2. Определены комплексные критерии для систем теплоснабжения, электроснабжения и водоснабжения.
3. Определена оптимальная очередность энергосберегающих мероприятий для всех типов зданий.

Библиографический список

1. Дилигенский Н.В., Цапенко М.В. Многокритериальная оценка сравнительной эффективности организационных систем управления // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды VIII межд. конф. Самара: САМНЦ РАН, 2006. С. 66-72. EDN: [JAXCTH](#)
2. Thanassoulis E., Allen R. Simulating Weights Restrictions in Data Envelopment Analysis by Means of Unobserved DMUs // Management Science. 1998, April. Vol. 44, No. 4. P. 586-594. DOI: [10.1287/mnsc.44.4.586](#)
3. The DEA Process, Usages and Interpretations. / A. Charnes, W.W. Cooper, A.Y. Lewin, L.M. Seiford // Data Envelopment Analysis: Theory, methodology and applications. New York: Springer Science+Business Media. 1994. P. 425-435. DOI: [10.1007/978-94-011-0637-5](#)
4. Дилигенский Н.В., Гаврилова А.А., Цапенко М.В. Построение и идентификация математических моделей производственных систем: Учебное пособие. Самара: ООО «Офорт», 2005. 126 с.
5. Обобщенная оценка сравнительной эффективности работы котельного оборудования / А.Г. Салов, А.А. Гаврилова, Ю.В. Чиркова, Л.А. Сагитова // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура: научно-технический журнал. 2016. № 2. С. 140-146. EDN: [WCFKUP](#)
6. Gavrilo A., Salov A., Sagitova L. System Analysis of the Effectiveness of Regional Energy System Management in the Conditions of Transformation // In Proc. 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara: IEEE, 2019. P. 736-741. DOI: [10.1109/CSCMP45713.2019.8976644](#). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8976644>
7. Gavrilo A.A., Salov A.G., Sagitova L.A. Assessment of the Efficiency of the Samara Region's Energy Complex Under Changing Conditions // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok: IEEE, 2020. P. 1-4. DOI: [10.1109/FarEastCon50210.2020.9271116](#). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9271116>

References

1. Diligenskij, N. V., & Capenko, M. V. (2006). *Mnogokriterial'naya ocenka sravnitel'noj effektivnosti organizacionnyh sistem upravleniya* [Multi-criteria assessment of the comparative effectiveness of organizational management systems] // In *Proc. of the VIII int. conf. Samara Problems of control and modeling in complex systems*. (pp. 66-72). SAMNC RAN. [In Russian]
2. Thanassoulis, E., & Allen, R. (1998). Simulating Weights Restrictions in Data Envelopment Analysis by Means of Unobserved DMUs. *Management Science*, 44(4), 586-594. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.44.4.586>
3. Charnes, A., Cooper, W. W., Lewin, A. Y., & Seiford, L. M. (1994). The DEA Process, Usages and Interpretations. In *Data Envelopment Analysis: Theory, methodology and applications* (pp. 425-435). Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0637-5>
4. Diligenskij, N. V., Gavrilo A. A., & Capenko, M. B. (2005). *Postroenie i identifikaciya matematicheskikh modelej proizvodstvennyh sistem: Uchebnoe posobie*. [Construction and identification of mathematical models of production systems: Tutorial]. Izd-vo ООО «Офорт». [In Russian]



5. Salov, A. G., Gavrilova, A. A., Chirkova, YU. V., & Sagitova, L. A. (2016). Obobshchennaya ocenka sravnitel'noj effektivnosti raboty kotel'nogo oborudovaniya [Generalized assessment of the comparative efficiency of boiler equipment]. *Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo i arhitektura: nauchno-tekhnicheskij zhurnal*, 2, 140-146. <https://elibrary.ru/wcfkup> [In Russian]
6. Gavrilova, A., Salov, A., & Sagitova, L. (2019). System Analysis of the Effectiveness of Regional Energy System Management in the Conditions of Transformation. In *Proc. 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*. (pp. 736-741). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSCMP45713.2019.8976644>.
7. Gavrilova, A. A., Salov, A. G., & Sagitova, L.A. (2020). Assessment of the Efficiency of the Samara Region's Energy Complex Under Changing Conditions. In *Proc. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271116>

Сведения об авторах

Гаврилова Анна Александровна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» СамГТУ, г. Самара.

ORCID: [0000-0001-6598-6518](https://orcid.org/0000-0001-6598-6518)

E-mail: a.a.gavrilova@mail.ru

Сагитова Ляйсан Акзамовна, старший преподаватель кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция».

ORCID [0000-0002-0833-983X](https://orcid.org/0000-0002-0833-983X)

E-mail: l0410@mail.ru

Чичев Илья Сергеевич, студент Колледжа СамГТУ

Authors about

Anna Aleksandrovna Gavrilova, Cand. of Tech. Sciences, Samara State Technical University, Department of Control and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes.

ORCID: [0000-0001-6598-6518](https://orcid.org/0000-0001-6598-6518)

E-mail: a.a.gavrilova@mail.ru

Lyajsan Akzamovna Sagitova, Samara State Technical University, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation.

ORCID [0000-0002-0833-983X](https://orcid.org/0000-0002-0833-983X)

E-mail: l0410@mail.ru

Ilya Sergeevich Chichev, Samara State Technical University

