

## Оценка устойчивости, достигаемой зданием за счет реализации энерго-ресурсосберегающих решений

С.Г. Шеина, Е.Н. Миненко

*Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В статье предложена методика определения эффективности ресурсосберегающих решений в жилищном строительстве на основе оценки устойчивости, достигаемой зданием при их реализации. Авторами разработана система показателей, характеризующих социальные, экономические и экологические аспекты устойчивости принимаемых энергоресурсосберегающих решений, предложены шкалы их балльной оценки, введен интегральный показатель устойчивости здания.

**Ключевые слова:** энергоресурсосберегающие решения, устойчивое развитие, метод экспертных оценок, метод парных сравнений, эффективность ресурсосберегающих решений, жилые здания, интегральный показатель устойчивости здания.

Эффективность реализации энергоресурсосберегающих решений (ЭРР) в жилищном строительстве оценивается рядом показателей, наиболее распространенными из которых являются экономические. Экономическая эффективность является одним из важнейших аспектов принятия на практике решений о реализации мер, направленных на повышение эффективности потребления зданием ресурсов, но не единственным. Так, с позиции устойчивого развития, применяемые в жилищном строительстве энергоресурсосберегающие мероприятия должны не только решать задачу экономии ресурсов, но и повышать уровень комфортности зданий, качество жизни людей, способствовать сохранению окружающей среды и здоровья человека [1]. То есть должны обеспечивать экономическую, социальную и экологическую эффективность [2] жизненного цикла здания. Такой подход к энергосбережению затрагивает основные принципы устойчивого развития: баланс экономических, экологических и социальных интересов общества [3,4].

Для оценки устойчивости, достигаемой зданием, за счет реализации рассматриваемых вариантов ЭРР, предлагается использовать интегральный

показатель устойчивости строительного объекта  $S_{уст}$ , рассчитываемый по формуле (1):

$$S_{уст} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} \times w_i \times 100, \quad (1)$$

где  $X_{ij}$  – оценка в баллах  $j$ -го показателя  $i$ -й группы факторов устойчивости;  $n$  – количество показателей устойчивости;  $w_i$  – весомость  $i$ -го фактора устойчивости;  $m$  – количество факторов устойчивости.

Устойчивость здания характеризуется 3 группами факторов: социальными, экономическими и экологическими. Значимость (вес) каждой группы факторов ( $w_i$ ) в общей устойчивости здания получена в результате их экспертной оценки по методу парных сравнений [5]. Для этого использована следующая градация оценок значимости факторов:

$$r_{kl}^h = \begin{cases} 5, & \text{если фактор } k \text{ оказывает большее влияние на устойчивость, чем фактор } l; \\ 3, & \text{если факторы равнозначны;} \\ 1, & \text{если фактор } k \text{ оказывает меньшее влияние, чем фактор } l \end{cases}$$

где  $r_{kl}^h$  – экспертная оценка каждой пары факторов устойчивости.

В результате опроса трех экспертов о степени влияния на устойчивость зданий трех различных групп факторов получены следующие таблицы (матрицы) парных сравнений.

Таблица №1

Результаты попарного сравнения экспертами факторов устойчивости здания

Эксперт 1				Эксперт 2				Эксперт 3			
i \ j	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>	i \ j	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>	i \ j	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>
w <sub>1</sub>	3	5	1	w <sub>1</sub>	3	3	1	w <sub>1</sub>	3	3	3
w <sub>2</sub>	1	3	1	w <sub>2</sub>	3	3	1	w <sub>2</sub>	3	3	3
w <sub>3</sub>	5	5	1	w <sub>3</sub>	5	5	3	w <sub>3</sub>	3	3	3

Как видно из таблицы №1, оценка вклада каждого фактора в достижение зданием устойчивости первым экспертом может быть представлена в виде следующего ранжированного ряда:  $w_3 > w_1 > w_2$ , где  $w_1$  – экологический фактор,  $w_2$  – социальный и  $w_3$  – экономический фактор. Второй эксперт рав-

нозначно оценил значимость социального и экологического факторов ( $w_1=w_2$ ), при этом наиболее значимым был признан экономический фактор. Третий эксперт равнозначно оценил все три группы факторов.

Для перехода от индивидуальных экспертных оценок к общей групповой оценке степени влияния каждого фактора на общую устойчивость здания построена матрица математических ожиданий [6, 7] оценок каждой пары факторов  $X = |x_{kl}|$ , элементы которой рассчитаны по формуле:

$$x_{kl} = M[r_{kl}^h] = 5 \times \frac{p_i}{p} + 3 \times \frac{p_p}{p} + 1 \times \frac{p_j}{p},$$

где  $h=1, 2, \dots, p$  – номер эксперта;  $x_{kl} = M[r_{kl}^h]$  – матрица математических ожиданий дискретной случайной величины  $r_{kl}^h$ ;  $p_i$  – количество экспертов, высказавшихся в пользу предпочтений фактора  $k$  (оценка 5);  $p_j$  – количество экспертов, высказавшихся в пользу предпочтений фактора  $l$  (оценка 1);  $p_p$  – количество экспертов, высказавшихся в пользу равенства факторов (оценка 3).

Полученные значения  $X_{ij}$  образует матрицу  $X = |X_{ij}|$  размером  $3 \times 3$  (таблица №2).

Таблица № 2

Матрица математических ожиданий групповых оценок пар факторов устойчивости

k \ l	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>
w <sub>1</sub>	3	11/3	5/3
w <sub>2</sub>	7/3	3	5/3
w <sub>3</sub>	13/3	13/3	7/3

 → 

k \ l	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>
w <sub>1</sub>	9/3	11/3	5/3
w <sub>2</sub>	7/3	9/3	5/3
w <sub>3</sub>	13/3	13/3	7/3

 →  $X = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 9 & 11 & 5 \\ 7 & 9 & 5 \\ 13 & 13 & 7 \end{vmatrix}$ 

Коэффициенты (веса) относительной важности каждого фактора в общей устойчивости здания представляют собой вектор матрицы вида:

$$w = [w_1, w_2, w_3]^T = \begin{vmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_n \end{vmatrix},$$

Расчет вектора матрицы выполняют в следующей последовательности:

1. Принимаем, что  $w^0 = [111...1]^t$ ,  $t = \underbrace{(1, 2, \dots, n)}_n$ , где  $t$  – шаг расчета.

2. Рассчитываем рекуррентные соотношения по формулам:

$$w^t = \frac{1}{\lambda^t} \times X \times w^{t-1} \quad (2)$$

$$\lambda^t = [111...1] \times X \times w^{t-1}, \quad (3)$$

где  $X$  – матрица математических ожиданий оценок пар объектов;  $w^t$  – вектор коэффициентов относительной важности факторов порядка  $t$ ;  $\lambda^t$  – числовой коэффициент.

3. Проверяем условие сходимости алгоритма:  $\|w^t - w^{t-1}\| < E$  (4)

Точность итерационной процедуры для проверки сходимости значений примем в расчетах равной  $E=0,001$ . Если условие 5 не выполняется, то возвращаются к пункту 2 данного алгоритма.

4. Проверяем условие нормировки:  $\sum_{i=1}^n w_i^t = 1$  (5)

Расчет  $w^t$  выполняют до тех пор, пока не будет выполнено условие (5).

Описанный выше алгоритм расчета вектора матрицы представлен в виде блок-схемы на рис.1 ниже.

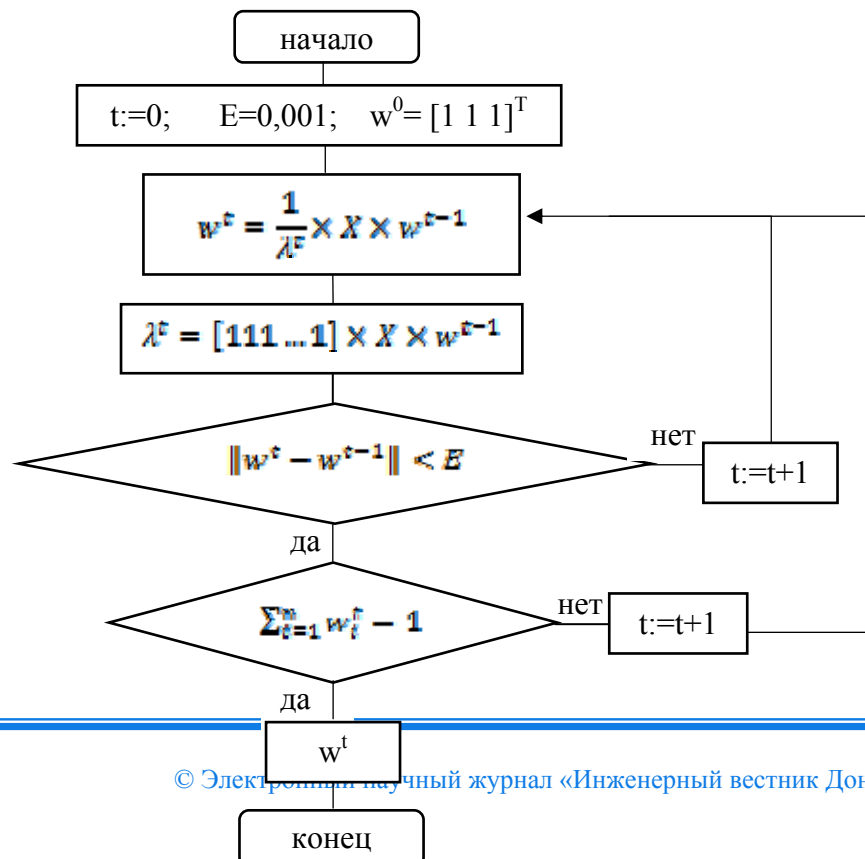


Рис. 1. – Алгоритм расчета вектора матрицы математических ожиданий групповых оценок пар факторов устойчивости

В соответствии с предложенным алгоритмом выполнен расчет вектора матрицы математических ожиданий групповых оценок пар факторов устойчивости по формулам (2), (3), (4) и (5). Условие сходимости выполняется на 3 шаге расчета ( $t = 3$ ):

$$X \times w^{t-1} = X \times w^2 = \frac{1}{3} \times \begin{vmatrix} 9 & 11 & 5 \\ 7 & 9 & 5 \\ 13 & 13 & 7 \end{vmatrix} \times \frac{1}{1979} \begin{vmatrix} 621 \\ 529 \\ 829 \end{vmatrix} = \frac{1}{5937} \times \begin{vmatrix} 15553 \\ 13253 \\ 20753 \end{vmatrix}$$

$$\lambda^3 = [111] \times X \times w^2 = [111] \times \frac{1}{5937} \times \begin{vmatrix} 15553 \\ 13253 \\ 20753 \end{vmatrix} = \frac{49559}{5937}$$

$$w^3 = \frac{5937}{49559} \times \frac{1}{5937} \times \begin{vmatrix} 15553 \\ 13253 \\ 20753 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,314 \\ 0,267 \\ 0,419 \end{vmatrix}$$

$$\max(|0,314 - 0,314|, |0,267 - 0,267|, |0,419 - 0,419|) = 0 < 0,001$$

$$\sum w = 0,314 + 0,267 + 0,419 = 1$$

Таким образом, за групповую оценку степени влияния каждого фактора на общую устойчивость здания принимается вектор вида:  $w = [0,314 \ 0,267 \ 0,419]^T$ , где 0,314 – вес экономической группы факторов в общей устойчивости здания;  $w_2=0,267$  – вес социальной;  $w_3=0,419$  – вес экологической группы факторов.

Каждую группу факторов устойчивости характеризует группа показателей, наиболее значимых, на наш взгляд, с точки зрения оценки устойчивости здания и прилегающей к нему территории на первоначальном этапе перехода строительной отрасли на стандарты устойчивости (таблица №3).

Таблица № 3

Факторы и их показатели устойчивости строительного объекта [8]

Факторы устойчивости (i)	Экологические	Социальные	Экономические
Вес фактора	$w_1=0.419$	$w_2=0.267$	$w_3=0.314$
Показатели устойчивости (X <sub>ij</sub> )	Энергосбережение и энергоэффективность X <sub>11</sub>	Формирование безопасной среды для жизнедеятельности человека X <sub>21</sub>	Снижение эксплуатационных затрат X <sub>31</sub>
	Применение альтернативных источников энергии X <sub>12</sub>	Обеспечение внутренней комфортности зданий X <sub>22</sub>	Показатель эффективности энергосберегающих мероприятий с учетом тарифов на энергию X <sub>32</sub>
	Сокращение выбросов вредных веществ в атмосферу X <sub>13</sub>	Учет принципов эргономичности при проектировании здания X <sub>23</sub>	Показатель сравнительной эффективности энергосбережения X <sub>33</sub>
	Рациональное водопользование X <sub>14</sub>	Доступность объекта и условия жизнеобеспечения для МГН X <sub>24</sub>	Чистый дисконтированный доход X <sub>34</sub>
	Способы обращения с бытовыми отходами X <sub>15</sub>		
	Применение материалов и изделий, имеющих экологический сертификат соответствия X <sub>16</sub>	Видеоэкология, улучшение визуальной среды города X <sub>25</sub>	Срок окупаемости X <sub>35</sub>
Благоустройство и озеленение прилегающей территории X <sub>26</sub>		Внутренняя норма доходности X <sub>36</sub>	

Представленный в таблице №3 перечень показателей был сформулирован на основе анализа современных систем рейтинговой оценки зеленого строительства, а также существующих тенденций и проблем в части обеспечения внутренней и внешней комфортности жилых зданий [9]. Так, например, в число показателей, характеризующих социальные факторы устойчивости, как видно из таблицы №3, включено требование эргономичности применяемых решений. Это связано с тем, что максимальный учет антропометри-

ческих данных и психофизиологических особенностей людей при проектировании здания, его интерьеров и экстерьеров, ландшафтного дизайна обеспечивает создание гармоничной среды обитания человека, наиболее благоприятные условия жизнедеятельности и психического состояния человека, сохранение его здоровья, развитие личности.

Число показателей в каждой группе выбрано с учетом требований, предъявляемых в методе экспертных оценок к количеству оцениваемых параметров: не менее 4 и не более 7, т.к. меньшее количество показателей ведет к информационной недостаточности, а большее количество – влечет расфокусировку результата [10].

Для каждого показателя была разработана шкала оценок (в баллах от 0 до 1) степени достижения его проектными решениями. Значение «0» баллов характеризует низкую степень достижения проектом данного требования (показателя), «1» – высокую степень, а значения от 0,1 до 0,9 – средние значения выраженности показателей (таблица №4) [8].

Таблица № 4

Пример балльной шкалы оценки выраженности показателей устойчивости

№ п/п	Наименование критерия устойчивости	Показатель, характеризующий критерий	Значение показателя	Баллы
1	Формирование безопасной среды для жизнедеятельности человека $X_{21}$	Качество воздуха внутри помещений	высокое	$X_{21}'=0,4$
			среднее	$X_{21}'=0,2$
			низкое	$X_{21}'=0$
		Уровень защиты здания, жилых территорий от шума	высокий	$X_{21}''=0,3$
			средний	$X_{21}''=0,15$
			низкий	$X_{21}''=0$
		Предусмотрены мероприятия по защите здания от ЭМИ	да	$X_{21}'''=0,3$
нет	$X_{21}'''=0$			
2	Учет принципов эргономичности при про-	Проектирование выполняют в соответствии с возможностя-	да	$X_{23}=1$

	ектировании здания $X_{23}$	ми органов чувств, деятельностью, размером и поведением людей	нет	$X_{23}=0$
3	Применение альтернативных источников энергии $X_{12}$	Доля альтернативных источников энергии в общем энергопотреблении здания	> 50 %	$X_{12} = 1$
			16-50%	$X_{12} = 0,66$
			1-15 %	$X_{12} = 0,33$
			0 %	$X_{12} = 0$
4	Способы обращения с бытовыми отходами $X_{15}$	Внедрение технологий использования отходов в качестве вторичного сырья	да	$X_{15}'=0,4$
			нет	$X_{15}'=0$
		Повышение уровня экологической культуры населения	да	$X_{15}''=0,3$
			нет	$X_{15}''=0$
		Внедрение системы раздельного сбора отходов	да	$X_{15}'''=0,3$
			нет	$X_{15}'''=0$
5	Снижение эксплуатационных затрат $X_{31}$	Эксплуатационные затраты снижены по сравнению с обычным зданием на	> 60 %	$X_{31}=1$
			41-60 %	$X_{31}=0,75$
			21-40%	$X_{31}=0,5$
			1-20%	$X_{31}=0,25$
			0%	$X_{31}=0$
6	Чистый дисконтированный доход (ЧДД) $X_{34}$		ЧДД>0	$X_{34}= 1$
			ЧДД=0	$X_{34}= 0,5$
			ЧДД<0	$X_{34}= 0$

В процессе выбора оптимальных вариантов ЭРР из нескольких альтернативных выполняют оценку в баллах их соответствия каждому из представленных в таблице №3 показателей. Полученные значения ( $X_{ij}$ ) суммируются и умножаются на вес значимости ( $w_i$ ) соответствующей группы факторов устойчивости. Далее по формуле (1) рассчитывают интегральный показатель устойчивости  $S_{уст}$ .

В зависимости от величины  $S_{уст}$  предлагается классифицировать степень устойчивость строительного объекта по категориям: высокая, средняя, низкая и очень низкая (таблица №5).

Таблица № 5



### Классификация степени устойчивости здания

Степень устойчивости здания	Интервал значений показателя устойчивости объекта, балл
Высокая	421-570
Средняя	281-420
Низкая	141-280
<b>очень низкая</b>	<b>0-140</b>

Принятая шкала значений показателя устойчивости имеет одинаковый диапазон значений, при этом нижний порог значений показателя  $S_{уст}$  равен минимально возможной общей оценке соответствия проектных решений установленным показателям, а верхний порог – максимально возможному количеству баллов, получаемых по результатам такой оценки.

В соответствии с предложенной нами методикой, значение интегрального показателя устойчивости здания, равное 141 баллу ( $S_{уст}^{min}=141$ ), принято в качестве минимально допустимого уровня, при котором вариант ресурсосберегающих проектных решений допускается к дальнейшему рассмотрению и оценке. При получении итогового балла ниже 141 рекомендуется включить в проект дополнительные мероприятия по повышению его устойчивости.

Предложенная в статье методика позволяет оценить социальные, экологические и экономические аспекты принимаемых ресурсосберегающих организационно-технологических решений в жилищном строительстве. Достижимый в ее рамках баланс экономических, экологических и социальных интересов общества при выборе энергоресурсосберегающих решений, обеспечивает внедрение в практику проектирования и строительства современных экологичных технологий и материалов, принципов устойчивого развития.

### Литература

1. Умнякова Н.П. Возведение энергоэффективных зданий в целях уменьшения негативного воздействия на окружающую среду // Вестник МГСУ. 2011. №3-1. С. 459-464.

2. Лысова Е.П. Выбор критериев оценки эффективности мероприятий по обеспечению экологической безопасности предприятий топливно-энергетического комплекса // Инженерный вестник Дона, 2013, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1965/.

3. Бегун Т.В. Устойчивое развитие: определение, концепция и факторы в контексте моногородов. Экономика, управление, финансы // II международная научная конференция. Пермь: Меркурий, 2012. С. 158-163.

4. Drongelen W. Sustainable Urban Development. 3-rd ed. London: Routledge, 2014. 392 p.

5. Шабаева Ю.И. Групповая экспертная оценка значимости факторов на основе использования метода парного сравнения // Инженерный вестник Дона, 2014, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2691/.

6. Kingsley, D.C. and T.C. Brown, 2013. Estimating willingness to accept using paired comparison choice experiments: tests of robustness. Journal of Environmental Economics and Policy, 2(2). Date Views 30-09-2017. URL: dx.doi.org/10.1080/21606544.2013.775602/.

7. Brown, T.C., D.C. Kingsley, G.L. Peterson, N.E. Flores, A. Clarke and A. Birjulin, 2008. Reliability of individual valuations of public and private goods: Choice consistency, response time, and preference refinement. Journal of Public Economics, 92 (pp.1595-1606). Date Views 30-09-2017. URL: fs.fed.us/rm/value/docs/Reliability\_of\_individual\_valuations.pdf/.

8. Шеина С.Г., Миненко Е.Н. Методика выбора организационно-технологических ресурсосберегающих решений в жилищном строительстве по многокритериальной системе оценки // Жилищное строительство. 2016. №6. С. 42-45.

9. Noghin, V.D., 2001. What is the relative importance of criteria and how to use it in MCDM. Proceedings of the XV International Conference on "Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium", Springer, pp: 59-68.



10. Champ, P.A. and J.B. Loomis, 1998. WTA Estimates Using the Method of Paired Comparison: Tests of Robustness. *Environmental and Resource Economics*, 12(3): pp.175–186.

### References

1. Umnyakova N.P. *Vestnik MGSU*. 2011. №3-1. pp. 459-464.
2. Lysova E.P. *Inzhenernyj vestnik Dona (Rus)*, 2013, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1965/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1965/).
3. Begun T.V. II mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya: Trudy (Proc. The Second International Scientific Conference). Perm': Merkurij, 2012. pp. 158-163.
4. Drongelen W. *Sustainable Urban Development*. 3-rd ed. London: Routledge, 2014. 392 p.
5. Shabaeva Yu.I. *Inzhenernyj vestnik Dona (Rus)*, 2014, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2691/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2691/).
6. Kingsley, D.C. and T.C. Brown, 2013. Estimating willingness to accept using paired comparison choice experiments: tests of robustness. *Journal of Environmental Economics and Policy*, 2(2). Date Views 30-09-2017. URL: [dx.doi.org/10.1080/21606544.2013.775602/](http://dx.doi.org/10.1080/21606544.2013.775602/).
7. Brown, T.C., D.C. Kingsley, G.L. Peterson, N.E. Flores, A. Clarke and A. Birjulin, 2008. Reliability of individual valuations of public and private goods: Choice consistency, response time, and preference refinement. *Journal of Public Economics*, 92 (pp.1595-1606). Date Views 30-09-2017. URL: [fs.fed.us/rm/value/docs/Reliability\\_of\\_individual\\_valuations.pdf/](http://fs.fed.us/rm/value/docs/Reliability_of_individual_valuations.pdf/).
8. Sheina S.G., Minenko E.N. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2016. №6. pp. 42-45.
9. Noghin, V.D., 2001. What is the relative importance of criteria and how to use it in MCDM. *Proceedings of the XV International Conference on "Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium"*, Springer, pp: 59-68.



10. Champ, P.A. and J.B. Loomis, 1998. WTA Estimates Using the Method of Paired Comparison: Tests of Robustness. *Environmental and Resource Economics*, 12(3): pp.175–186.