

## 05.23.08 ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

# Сравнение потребления топливно-энергетических ресурсов на строительной площадке при возведении объектов малоэтажного и многоэтажного жилищного строительства

**Журавлева А.А.**

Аспирант жилищно-коммунального комплекса, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (г. Москва)

**Король О.А.**

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Жилищно-коммунальный комплекс», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (г. Москва); e-mail: mrkorol.oleg@gmail.com

Статья получена: 05.07.2020. Рассмотрена: 09.07.2020. Одобрена: 02.08.2020. Опубликовано онлайн: 30.09.2020. ©РИОР

**Аннотация.** Проведена многокритериальная оценка выбора рационального варианта возведения малоэтажных жилых зданий с учетом потребления энергоресурсов на строительной площадке. Рассмотрена структура энергозатрат при возведении объектов малоэтажного и многоэтажного жилищного строительства, а также проведено сравнение удельных расходов ТЭР при возведении комплекса малоэтажных и многоэтажного монолитного жилого здания.

**Ключевые слова:** малоэтажные здания, энергопотребление, многокритериальная оценка, возведение объектов капитального строительства.

## 1. Введение

В настоящее время российский сектор малоэтажного домостроения находится в стадии

динамичного развития. В отечественной практике малоэтажного строительства применяются различные технологии возведения. К наиболее распространенным относятся технологии с использованием мелкоштучных материалов (кирпич, легкобетонные блоки, камень), деревянных конструкций (каркасные, брусчатые), промышленных изделий (*SIP*-панели), а также комбинированных систем (несъемная опалубка из пенополистирола) [1]. Важно отметить, что этап строительного производства составляет существенную долю в общем инвестиционном цикле возведения зданий [2] и отличается, как правило, капиталоемкостью, спецификой используемого строительного оборудования, техники и технологий, а также организацией временных жилых и административно-хозяйственных зданий на стро-

### COMPARISON OF THE CONSUMPTION OF FUEL AND ENERGY RESOURCES AT A CONSTRUCTION SITE DURING THE CONSTRUCTION OF LOW-RISE AND MULTI-STORY HOUSING CONSTRUCTION

**Zhuravleva A.A.**

Postgraduate Student, Housing and Communal Complex, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

**Korol' O.A.**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Housing and Communal Complex Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow; e-mail: mrkorol.oleg@gmail.com

**Manuscript received:** 05.07.2020. **Revised:** 09.07.2020. **Accepted:** 02.08.2020. **Published online:** 30.09.2020. ©RIOR

**Abstract.** A multicriteria assessment of the choice of a rational option for the construction of low-rise residential buildings, taking into account the consumption of energy resources at the construction site, has been carried out. The structure of energy consumption during the construction of low-rise and multi-storey housing construction is considered, as well as a comparison of the specific costs of fuel and energy resources during the construction of a complex of low-rise and multi-storey monolithic residential buildings.

**Keywords:** low-rise buildings, energy consumption, multi-criteria assessment, construction of capital construction projects.

ительной площадке. При этом расходы топливно-энергетических ресурсов (далее — ТЭР) на энергопотребление строительной площадки, организацию бытового городка, работу машин, оборудования и механизированного инструмента могут занимать немаловажную часть в общей структуре расходов на строительство.

## 2. Постановка задачи

Для проведения исследования были выбраны технологии, получившие в настоящее время наибольшее распространение в практике малоэтажного строительства: возведение из кирпича (вариант № 1); возведение из легковесных блоков (керамзитобетонные блоки) — вариант № 2; возведение из несъемной опалубки в виде пенополистирольных блоков с заполнением межопалубочного пространства легковесной смесью (вариант № 3); возведение из SIP-панелей (вариант № 4). В качестве объекта малоэтажного строительства выбран проект двухэтажного жилого дома прямоугольной формы, который может быть возведен по любой из рассматриваемых технологий малоэтажного домостроения.

Учитывая различия в характере малоэтажной жилой застройки и применяемых технологиях строительства, количество и структура энергопотребителей могут существенно отличаться. В этой связи актуальным является вопрос выбора рационального варианта возведения малоэтажных жилых зданий посредством проведения многокритериальной оценки согласно критериям эффективности, а также сравнения удельных энергозатрат строительной площадки при возведении малоэтажных и многоэтажных жилых зданий.

## 3. Многокритериальная оценка и выбор рационального варианта возведения малоэтажных жилых зданий

Для проведения многокритериальной оценки рассмотрены принятые четыре технологии возведения комплекса от 5 до 30 малоэтажных жилых зданий. Сравнение организационно-технологических параметров вариантов воз-

ведения малоэтажных жилых зданий проводилось по показателям эффективности, расчет которых осуществлялся согласно формулам, представленным в табл. 1.

Таблица 1

### Формулы расчета показателей эффективности возведения комплекса малоэтажных жилых зданий

№ п/п	Показатель эффективности	Формула расчета	Обозначения
1	Производственная мощность потока	$M = \frac{S}{T}$	$S$ — площадь зданий; $T$ — продолжительность строительства
2	Производительность потока	$P = \frac{S}{Q}$	$S$ — площадь зданий; $Q$ — общая трудоемкость
3	Удельная трудоемкость	$Q_{уд} = \frac{Q}{S}$	
4	Максимальное число рабочих	$N$ (в наиболее загруженную смену)	—
5	Продолжительность строительства	$T$ (согласно графику производства работ)	—
6	Суммарная продолжительность частных потоков строительства	$T_{\Sigma} = \sum t_i$	$t_i$ — продолжительность $i$ -го строительного потока
7	Удельные расходы ТЭР	$E_{уд} = \frac{E}{S}$	$E$ — расходы ТЭР; $S$ — площадь зданий

Исходные данные для расчета показателей эффективности сравниваемых вариантов возведения малоэтажных жилых зданий по рассматриваемым технологиям строительства представлены в табл. 2.

Так, в результате произведенных расчетов получены не показатели вариантов возведения пяти малоэтажных жилых зданий можно представить в виде матрицы в следующем виде:

$$\overline{K}_1 = \begin{matrix} & X1 & X2 & X3 & X4 & X5 & X6 & X7 & X8 \\ \begin{matrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0,21 & 5,0 & 4,7 & 19 & 191 & 412 & 1,9 & 4,4 \\ 0,28 & 8,2 & 3,6 & 16 & 116 & 281 & 1,3 & 0,7 \\ 0,26 & 7,1 & 3,8 & 14 & 133 & 317 & 2,2 & 0,8 \\ 0,25 & 9,4 & 4,1 & 11 & 101 & 170 & 1,3 & 0,4 \end{vmatrix} \end{matrix}.$$

Данная матрица может быть решена на основе использования методов решения кон-

## Исходные данные для расчета показателей эффективности возведения малоэтажных жилых зданий

Вариант технологии возведения	Количество зданий	Продолжительность строительства (Т), дн.	Общая трудоемкость (Q), чел.-дн.	Общая площадь зданий (S), м <sup>2</sup>	Максимальное число рабочих (N), чел.	Расходы ТЭР (Е) группы «Машины и механизмы», кг у.т.	Расходы ТЭР (Е) группы «Временная инфраструктура стройплощадки», кг у.т.
№ 1	5	191	4425	950	19	1770	4183
№ 2	5	116	3450	950	16	1245	652
№ 3	5	133	3650	950	14	2055	806
№ 4	5	101	385	950	11	1200	372
№ 1	10	212	8850	1900	29	3540	7067
№ 2	10	130	6900	1900	23	2490	957
№ 3	10	154	7300	1900	19	4110	2824
№ 4	10	113	7710	1900	21	2400	599
№ 1	15	192	13 275	2850	47	5310	8502
№ 2	15	117	10 350	2850	40	3735	1196
№ 3	15	134	10 950	2850	33	6165	1712
№ 4	15	105	9075	2850	25	3600	814
№ 1	20	213	17 700	3800	57	7080	12 318
№ 2	20	131	13 800	3800	47	4980	1681
№ 3	20	155	14 600	3800	38	8220	4515
№ 4	20	118	15 420	3800	29	4800	1076
№ 1	25	193	22 125	4750	75	8850	13 583
№ 2	25	118	17 250	4750	64	6225	1895
№ 3	25	135	18 250	4750	52	10 275	2809
№ 4	25	109	19 275	4750	39	6000	1361
№ 1	30	214	26 550	5700	85	10 620	17 816
№ 2	30	132	20 700	5700	71	7470	2413
№ 3	30	156	21 900	5700	57	12 330	6249
№ 4	30	122	18 150	5700	42	7200	1564

фликтных ситуаций при неопределенности [3]. Выбор оптимального варианта возведения комплекса малоэтажных жилых зданий осуществляется с помощью критериев Вальда, Сэвиджа, а также фактора риска по Гурвицу.

Преобразуем элементы полученной матрицы. Элементы первого столбца определяем согласно формулам:

$$X_{11} = \left( \frac{X_{ij}}{X_{\max}} \right)^2 = \left( \frac{X_{11}}{X_{12}} \right)^2 = \left( \frac{0,21}{0,28} \right)^2 = 0,6;$$

$$X_{12} = \left( \frac{X_{ij}}{X_{\max}} \right)^2 = \left( \frac{X_{12}}{X_{12}} \right)^2 = \left( \frac{0,28}{0,28} \right)^2 = 1;$$

$$X_{13} = \left( \frac{X_{ij}}{X_{\max}} \right)^2 = \left( \frac{X_{13}}{X_{12}} \right)^2 = \left( \frac{0,26}{0,28} \right)^2 = 0,9;$$

$$X_{14} = \left( \frac{X_{ij}}{X_{\max}} \right)^2 = \left( \frac{X_{14}}{X_{12}} \right)^2 = \left( \frac{0,25}{0,28} \right)^2 = 0,8;$$

Элементы второго столбца получаем по формулам:

$$X_{21} = \left( \frac{X_{ij}}{X_{\max}} \right)^2 = \left( \frac{X_{21}}{X_{24}} \right)^2 = \left( \frac{5,0}{9,4} \right)^2 = 0,3;$$

$$X_{22} = \left( \frac{X_{ij}}{X_{\max}} \right)^2 = \left( \frac{X_{22}}{X_{24}} \right)^2 = \left( \frac{8,2}{9,4} \right)^2 = 0,8;$$

$$X_{23} = \left( \frac{X_{ij}}{X_{\max}} \right)^2 = \left( \frac{X_{23}}{X_{24}} \right)^2 = \left( \frac{7,1}{9,4} \right)^2 = 0,6;$$

$$X_{24} = \left( \frac{X_{ij}}{X_{\max}} \right)^2 = \left( \frac{X_{24}}{X_{24}} \right)^2 = \left( \frac{9,4}{9,4} \right)^2 = 1.$$

Аналогично выполняются расчеты для остальных столбцов.

В результате произведенных просчетов была получена преобразованная матрица:

$$\overline{K}_2 = \begin{array}{c|cccccccc} & X1 & X2 & X3 & X4 & X5 & X6 & X7 & X8 \\ B1 & 0,3 & 0,6 & 0,5 & 0,2 & 0,1 & 0,1 & 0,3 & 0,001 \\ B2 & 0,8 & 1 & 1 & 0,3 & 0,7 & 0,2 & 0,8 & 0,2 \\ B3 & 0,6 & 0,9 & 0,8 & 0,5 & 0,4 & 0,2 & 0,2 & 0,1 \\ B4 & 1 & 0,8 & 0,7 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array}.$$

Согласно критерию Вальда найдем оптимальный вариант возведения:

$$W_i = \min(x_{ij}), j = 1..M;$$

$$X^* = X_k, W_k = \max(W_i), i = 1..N. \quad (1)$$

В каждой строке преобразованной матрицы находим минимальные значения: 0,001, 0,2, 0,1 и 0,7. Из данных полученных значений выбираем максимальное — 0,7. Оно соответствует четвертому варианту возведения малоэтажных жилых зданий. В результате оптимальным, по критерию Вальда, является возведение малоэтажных жилых зданий из SIP-панелей.

Далее поиск оптимума проведем с помощью метода Сэвиджа. Согласно критерию Сэвиджа:

$$y_j = \max(x_{ij}); r_{ij} = y_j - x_{ij}; S_i = \max(r_{ij}), j = 1..M;$$

$$X^* = X_k, S_k = \min(S_i), i = 1..N. \quad (2)$$

Определим следующие значения:

$$r_{11} = \max x_{14} - x_{11} = 1 - 0,3 = 0,7;$$

$$r_{12} = \max x_{14} - x_{12} = 1 - 0,8 = 0,2;$$

$$r_{13} = \max x_{14} - x_{13} = 1 - 0,6 = 0,4.$$

$$r_{21} = \max x_{22} - x_{21} = 1 - 0,6 = 0,4;$$

$$r_{23} = \max x_{22} - x_{23} = 1 - 0,9 = 0,1;$$

$$r_{24} = \max x_{22} - x_{24} = 1 - 0,8 = 0,2.$$

Аналогичным образом выполняются расчеты для остальных значений.

Полученные значения преобразовываем в следующую матрицу:

$$\overline{K}_3 = \begin{array}{c|cccccccc} & X1 & X2 & X3 & X4 & X5 & X6 & X7 & X8 \\ B1 & 0,7 & 0,4 & 0,5 & 0,8 & 0,9 & 0,9 & 0,7 & 0,9 \\ B2 & 0,2 & 0 & 0 & 0,7 & 0,3 & 0,8 & 0,2 & 0,8 \\ B3 & 0,4 & 0,1 & 0,2 & 0,5 & 0,6 & 0,8 & 0,8 & 0,9 \\ B4 & 0 & 0,2 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}.$$

В каждой строке матрицы выбираем максимальное значение из всех в ней представленных. Получаем соответственно 0,9, 0,8, 0,9 и 0,3. Минимальным среди выбранных является значение 0,3, соответствующее четвертому варианту возведения.

Определение оптимального варианта по фактору риска Гурвица осуществляется в соответствии с:

$$x_{i \max} = \max(x_{ij}); x_{i \min} = \min(x_{ij}), j = 1..M;$$

$$H_i(\lambda) = \lambda x_{i \min} + (1 - \lambda) x_{i \max};$$

$$X^* = X_k, H_k(\lambda) = \max(H_i(\lambda)), i = 1..N. \quad (3)$$

С учетом значений матрицы  $\overline{K}_2$  при среднем значении коэффициента  $\lambda = 0,5$  определяем  $H_i$ :

$$H_1 = 0,5 \times 0,001 + (1 - 0,5) \times 1 = 0,5;$$

$$H_2 = 0,5 \times 0,2 + (1 - 0,5) \times 1 = 0,6;$$

$$H_3 = 0,5 \times 0,1 + (1 - 0,5) \times 1 = 0,6;$$

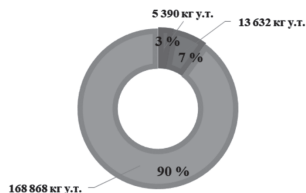
$$H_4 = 0,5 \times 0,7 + (1 - 0,5) \times 1 = 0,9.$$

Среди полученных максимальным значением является 0,9, т.е. оптимальным по факту риска Гурвица также является четвертый вариант возведения.

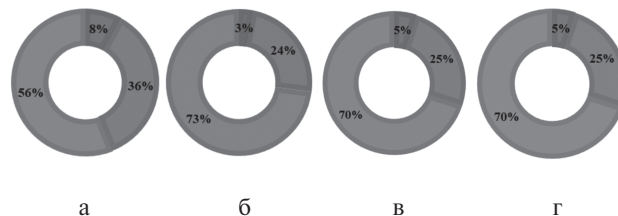
Аналогичным способом были произведены расчеты при возведении от 10 до 30 малоэтажных жилых зданий, для которых рациональным вариантом возведения согласно рассмотренным критериям Вальда, Сэвиджа и Гурвица также является строительство малоэтажных жилых зданий из SIP-панелей.

#### 4. Сравнение удельных энергозатрат при возведении малоэтажных и многоэтажных жилых зданий

Полученные результаты энергопотребления при возведении малоэтажных жилых зданий позволяют провести сравнение с расходами ТЭР при возведении многоэтажных жилых зданий. Для сравнения был принят объект-представитель — многоэтажный жилой дом общей площадью 14 142 м<sup>2</sup>, возводимый по технологии с применением монолитного железобетона. Согласно данным, приведенным в работе [4], структура расходов энергоресурсов при возведении многоэтажного жилого дома представляется в следующем виде (рис. 1). Структура энергопотребления в процентном соотношении (средние значения) для рассматриваемых вариантов возведения малоэтажных жилых зданий представлена на рис. 2.



**Рис. 1.** Структура расходов ТЭР при возведении многоэтажного жилого здания группами энергопотребителей: 3% — машины, механизмы и оборудование; 7% — технологические процессы; 90% — инфраструктура строительной площадки



**Рис. 2.** Структура расходов ТЭР при возведении малоэтажных жилых зданий по вариантам № 1 (а), № 2 (б), № 3 (в), № 4 (г) группами энергопотребителей: 8%, 3%, 5% — машины, механизмы и оборудование; 36%, 24%, 25% — технологические процессы; 56%, 73%, 70% — инфраструктура строительной площадки

Расходы энергоресурсов на возведение многоэтажного монолитного жилого дома общей площадью 14 142 м<sup>2</sup> составляют 187 890 кг у.т., т.е. в пересчете на 1 м<sup>2</sup> приходится 13,3 кг у.т./м<sup>2</sup>. В результате данного исследования расчеты показали, что значения удельных энергозатрат при возведении от 5 до 30 малоэтажных жилых зданий составляют: из кирпича — 5,2 кг у.т./м<sup>2</sup>, из керамзитобетонных блоков — 1,8 кг у.т./м<sup>2</sup>, из несъемной опалубки — 3,1 кг у.т./м<sup>2</sup>, из SIP-панелей — 1,5 кг у.т./м<sup>2</sup>. Таким образом, полученные значения удельных энергозатрат при возведении 1 м<sup>2</sup> малоэтажного жилого здания из кирпича, керамзитобетонных блоков, несъемной опалубки и SIP-панелей соответственно ниже в 3, 7, 4 и 9 раз в сравнении с удельными энергозатратами при возведении многоэтажного монолитного жилого здания.

#### Литература

1. Король Е.А. Анализ структуры энергозатрат при строительстве малоэтажных жилых зданий [Текст] / Е.А. Король, А.А. Журавлева // БСТ. — 2020. — № 3. — С. 62–64.
2. Король О.А. Исследования и наукоемкие разработки в области энергоэффективного строительного производства [Текст] / О.А. Король // Строительные материалы. — 2015. — № 6. — С. 13–15.
3. Завадскас Э.-К.К. Системотехническая оценка технологических решений строительного производства [Текст] / Э.-К.К. Завадскас. — Л.: Стройиздат, 1991.
4. Король О.А. Организационно-технологический механизм реализации энергосберегающих мероприятий при возведении объектов монолитного домостроения [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.08 / О.А. Король. — М.: Изд-во МГСУ, 2016. — 161 с.

#### References

1. Korol' E.A. Analiz struktury energozatrat pri stroitel'stve maloetazhnyh zhilyh zdaniy [Analysis of the structure of energy costs in the construction of low-rise residential buildings]. *BST* [BST]. 2020, I. 3, pp. 62–64.
2. Korol' O.A. Issledovaniya i naukoemkie razrabotki v oblasti energoeffektivnogo stroitel'nogo proizvodstva [Research and science-intensive developments in the field of energy efficient construction production]. *Nauchno-tekhnicheskij i proizvodstvennyj zhurnal «Stroitel'nye materialy»* [Scientific-technical and industrial magazine "Building materials"]. 2015, I. 6, pp. 13–15.
3. Zavadskas E.-K.K. *Sistemotekhnicheskaya ocenka tekhnologicheskikh reshenij stroitel'nogo proizvodstva* [Systematic assessment of technological solutions for construction production]. Strojizdat Publ., 1991.
4. Korol' O.A. *Organizacionno-tekhnologicheskij mekhanizm realizacii energosberegayushchih meropriyatij pri vozvedenii ob'ektov monolitnogo domostroeniya*. Kand. Diss. [Organizational and technological mechanism for the implementation of energy-saving measures in the construction of objects of monolithic housing construction. Cand. Diss.]. Moscow, 2016. 161 p.