

УДК 519.816; 620.9.004.18

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛОГО ЗДАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

©2010 Н.В. Дилигенский, В.И. Немченко, М.В. Посашков

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 10.11.2010

На основе принципов системного анализа разработан подход по выбору оптимального варианта исполнения систем тепло-, газо-, водо- и электроснабжения проектируемого жилого дома с позиции потребителя, застройщика и государства. Анализ сравнительной эффективности проводился на основе методологии DEA. Произведена оценка обобщенной интегральной энергоэффективности вариантов исполнения инженерных систем многоэтажного жилого дома.

Ключевые слова: *энергоэффективность, проектирование, системный анализ, метод DEA, математическая модель, весовой коэффициент, интегральная оценка*

При проектировании жилого дома одной из главных целей застройщика является минимизация общих капитальных затрат на строительство здания. Вопросам минимизации на этой стадии будущих эксплуатационных затрат на коммунальные услуги и, в первую очередь, оплат за тепловую и электрическую энергию и за энергоносители будущими жильцами, как правило, уделяется недостаточное внимание. Такой подход противоречит принципам системной эффективности и рационального использования энергоресурсов при проведении мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в соответствии с Федеральным Законом от 23.11.2009 г. №261-ФЗ «Об энергосбережении». Федеральный Закон приоритетным направлением определяет энергоэффективность вновь возводимых и реконструируемых домов, а также ежегодное снижение энергопотребления при эксплуатации [1].

**Цель настоящей работы:** проведение системного анализа и разработка методологии оценки эффективности вариантов исполнения систем энергоснабжения проектируемого жилого дома с позиции потребителя, государства и застройщика.

*Дилигенский Николай Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления и системного анализа в теплоэнергетике. E-mail: usat@samgtu.ru*

*Немченко Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры управления и системного анализа в теплоэнергетике. E-mail: nemchenko\_vi@mail.ru*

*Посашков Михаил Викторович, аспирант. E-mail: posashkovmv@svgc.ru*

Рассмотрим задачу выбора варианта энергоснабжения жилого дома на примере проектируемого десятиэтажного жилого дома, расположенного в г. Самаре, при условии наличия технической возможности подключения необходимых коммуникаций. Проведем комплексный анализ следующих традиционных вариантов исполнения инженерных систем жилого дома:

1 вариант – отопление и горячее водоснабжение централизованное от квартальной тепловой сети, кухни с газовыми плитами;

2 вариант – отопление и горячее водоснабжение от газовых котлов-колонок, кухни с газовыми плитами;

3 вариант – отопление и горячее водоснабжение от крышной котельной, кухни с газовыми плитами;

4 вариант – отопление и горячее водоснабжение централизованное от квартальной тепловой сети, кухни с электрическими плитами;

5 вариант – отопление и горячее водоснабжение от котлов-колонок, кухни с электрическими плитами;

6 вариант – отопление и горячее водоснабжение от крышной котельной, кухни с электрическими плитами.

Из перечисленных традиционных вариантов исполнения инженерных систем проектируемого многоэтажного жилого дома выделим наиболее важные характеристики для потребителя, застройщика и государства и проанализируем их. С позиции потребителя рассматриваемые варианты исполнения инженерных систем энергоснабжения должны обеспечивать минимальные эксплуатационные платежи

при достаточном объеме энергоресурсов [1]. С позиции застройщика инженерные системы должны обеспечивать наибольшую прибыль, обратным образом зависящую от капитальных затрат на сооружение инженерных систем дома с требуемым энергообеспечением. С позиции государства инженерные системы должны обеспечивать минимальное интегральное потребление всех видов энергоресурсов [1]. При анализе и выборе варианта исполнения инженерных систем жилого дома учитывались следующие агрегированные показатели: удельный расход газа на квадратный метр отопляемой площади –  $B$ , м<sup>3</sup>/год·м<sup>2</sup>, удельный расчетный

(средний за год) годовой расход воды на хозяйственно-питьевые нужды на квадратный метр отопляемой площади –  $q_w$ , м<sup>3</sup>/год·м<sup>2</sup>, удельные капитальные затраты на создание инженерных сетей на квадратный метр отопляемой площади –  $k$ , тыс. руб./м<sup>2</sup> и удельные эксплуатационные платежи на квадратный метр отопляемой площади,  $p$ , тыс. руб./м<sup>2</sup>. Подробный расчет агрегированных показателей представлен в работе [2]. В таблице 1 приведены значения агрегированных показателей для шести рассматриваемых вариантов инженерных систем энергоснабжения.

**Таблица 1.** Показатели потребления энергоресурсов

Показатели	Вариант исполнения дома					
	1	2	3	4	5	6
удельный расход газа $B$ , м <sup>3</sup> /(год·м <sup>2</sup> )	92,8	68,8	72,1	92,7	68,8	72
удельный расход холодной воды $q_w$ , м <sup>3</sup> /(год·м <sup>2</sup> )	2,94	3,85	5,07	2,94	3,85	5,07
удельные капитальные затраты $k$ , тыс. руб./м <sup>2</sup>	1,54	1,80	2,57	1,67	1,93	2,70
удельные эксплуатационные платежи, $p$ , тыс. руб./м <sup>2</sup>	0,60	0,38	0,41	0,56	0,34	0,36

Оценка варианта исполнения инженерных систем с позиции потребителя проводилась по трем показателям: удельному расходу газа –  $B$ , удельному расходу холодной воды –  $q_w$  и удельным эксплуатационным платежам –  $p$ , которые должны быть минимальными. Из таблицы 1 видно, что удельные эксплуатационные платежи минимальны у варианта 5 (0,34 тыс.руб./м<sup>2</sup>). У этого варианта также наименьший расход газа (68,8 м<sup>3</sup>/год·м<sup>2</sup>), такой же как у варианта 2, но больший чем у варианта 4 расход холодной воды (3,85 м<sup>3</sup>/год·м<sup>2</sup>). Минимальный удельный расход холодной воды у вариантов 1 и 4 (2,94 м<sup>3</sup>/год·м<sup>2</sup>). Анализ частных удельных показателей, приведенных в таблице 1, не дает однозначного ответа о варианте исполнения инженерных систем энергоснабжения, наилучшего с позиции потребителя.

Для решения этой задачи оптимального выбора применим метод многокритериального оценивания обобщенной сравнительной эффективности – Data Envelopment Analysis (DEA) [3]. Данный метод основан на решении совокупности задач математического программирования и минимизирует фактор субъективности при оценивании, что позволяет использовать его при анализе сложных систем с разнородными входными и выходными характеристиками. Построение математических моделей и последующие решения дают значения обобщенных коэффициентов эффективности, которые определяют сравнительную эффективность или степень неэффективности каждого

объекта. Объекты с максимальным коэффициентом эффективности (в методологии DEA он равен единице) формируют границу эффективности или эффективный фронт. Объекты, лежащие на этой границе, являются наиболее эффективными.

Для анализа сравнительной эффективности энергообеспечения с позиции потребителя сформируем на основе методологии DEA модель обобщенной оценки  $f_n$   $n$ -го варианта исполнения инженерных систем жилого дома в виде следующего функционала, отвечающего минимизации суммарных расходов энергоресурсов и эксплуатационных платежей:

$$f_n = \max_{v_1, v_2, v_3 \in G} \frac{1}{v_{1n} \cdot B_n + v_{2n} \cdot q_{wn} + v_{4n} \cdot p_n} \quad (1)$$

где,  $v_{1n}$ ,  $v_{2n}$ ,  $v_{3n}$  – положительные весовые коэффициенты, характеризующие относительный вклад каждого из частных показателей –  $B_n$ ,  $q_{wn}$ ,  $p_n$  в суммарный коэффициент эффективности  $f_n$  для  $n$ -го варианта энергообеспечения.

Расчет численных показателей комплексной энергоэффективности  $f_n$  ( $n=1, 2, \dots, 6$ ) для каждого варианта исполнения инженерных систем согласно методу DEA основывается на положении, что значения всех показателей комплексной энергоэффективности  $f_n$  нормируются на интервале  $[0;1]$ . Система ограничений, определяющая область значений  $G \in (v_{1n}, v_{2n}, v_{3n})$  в функционале (1), записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_{1_1} \cdot B_1 + v_{2_1} \cdot q_1 + v_{4_1} \cdot p_1} &\leq 1 \\ \frac{1}{v_{1_2} \cdot B_2 + v_{2_2} \cdot q_2 + v_{4_2} \cdot p_2} &\leq 1 \\ \dots\dots\dots & \\ \frac{1}{v_{1_6} \cdot B_6 + v_{2_6} \cdot q_6 + v_{4_6} \cdot p_6} &\leq 1 \\ v_1, v_2, v_4 &> 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Система соотношений (1) и (2) для рассматриваемых вариантов исполнения инженерных систем определяет шесть задач математического программирования. Решение каждой задачи дает значение показателя энергоэффективности варианта энергоснабжения  $f_n$  с позиции потребителя. Результаты решения задачи (1), (2) графически представлены на рис. 1. Максимальное значение показателя относительной энергоэффективности у варианта 5 ( $f=1$ ), характеризующегося минимальными значениями удельных эксплуатационных платежей и удельного расхода газа и небольшим превышением расхода холодной воды. Минимальные значения у варианта 1 ( $f=0,87$ ) и варианта 4 ( $f=0,9$ ), что соответствует высоким значениям их эксплуатационных затрат. У остальных вариантов значения показателей энергоэффективности примерно одинаковы ( $f=0,95 \div 0,96$ ). Таким образом, решение задач (1), (2) позволило оценить и выявить оптимальный вариант рассматриваемые варианты исполнения инженерных систем энергоснабжения жилого дома с позиции потребителя. Из анализа значений весовых коэффициентов можно сделать вывод, что при решении шести задач нелинейного математического программирования по (1), (2), наибольшее значение имеет показатель удельных эксплуатационных затрат. Остальные весовые коэффициенты оказывают меньшее влияние на величину функционал (1).

На следующем этапе проведена оценка оптимального варианта исполнения инженерных систем проектируемого жилого дома с позиции государства. Выбор оптимального варианта проводился по двум показателям: расходу газа  $B$  и удельному потреблению воды  $q_w$ . Задача ставится как обеспечение минимального интегрального расхода этих двух ресурсов в натуральном исполнении в соответствии с [1]. Численные значения показателей расхода энергоресурсов представлены в таблице 1. Удельный расход газа минимален у вариантов 2 и 5. Удельный расход холодной воды минимален у вариантов 1 и 4. Анализ показателей, приведенных в таблице 1, не дает однозначно

го ответа о варианте исполнения инженерных систем с позиции государства. Поэтому, как и в предыдущей задаче, для оценки систем энергообеспечения жилого дома используем метод DEA. В соответствии с методологией DEA сформируем модель обобщенной оценки энергоэффективности  $f_n$   $n$ -го варианта исполнения инженерных систем жилого дома с позиции государства в виде:

$$f_n = \max_{v_1, v_2 \in G} \frac{1}{v_{1n} \cdot B_n + v_{2n} \cdot q_{wn}} \quad (3)$$

Далее для каждого оцениваемого варианта исполнения инженерных систем максимизируем функционал (3) при наличии следующей системы ограничений, определяющей область значений  $G \in (v_{1n}, v_{2n})$ :

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_{1_1} \cdot B_1 + v_{2_1} \cdot q_{w1}} &\leq 1 \\ \frac{1}{v_{1_2} \cdot B_2 + v_{2_2} \cdot q_{w2}} &\leq 1 \\ \dots\dots\dots & \\ \frac{1}{v_{1_6} \cdot B_6 + v_{2_6} \cdot q_{w6}} &\leq 1 \\ v_1, v_2 &> 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Решение 6 задач математического программирования определяет значения проранжированных показателей сравнительной эффективности каждого варианта. Результаты расчета представлены на рис. 1. Из результатов расчета видно, что наивысший показатель сравнительной энергоэффективности у вариантов 1 и 4 ( $f=1$ ), что соответствует наименьшим расходам холодной воды. У вариантов 2 и 5 значение показателя сравнительной энергоэффективности составляет ( $f=0,76$ ), что объясняется повышенным расходом холодной воды. Самые низкие значения сравнительной энергоэффективности у вариантов 3 и 6 ( $f=0,46$ ), что отвечает высокому потреблению холодной воды. Из анализа весовых коэффициентов следует вывод, что наибольшее влияние на значение функционала (3) оказывает величина расхода холодной воды. Решение задач (3), (4) позволило ранжировать рассматриваемые варианты исполнения инженерных систем жилого дома с позиции государства.

Для оценки варианта исполнения инженерных систем энергообеспечения жилого дома с позиции застройщика используем три показателя: удельные капитальные затраты –  $k$ , удельный расход газа –  $B$  и удельный расход

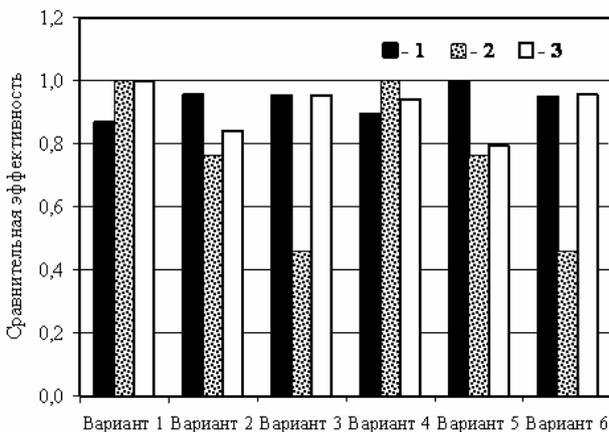
холодной воды –  $q_w$ , значения которых представлены в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что удельный расход газа минимален у вариантов 2 и 5. Минимальный удельный расход холодной воды у вариантов 1 и 4. Удельные капитальные затраты минимальны у варианта 1 (1,54 тыс.руб./м<sup>2</sup>). Анализ показателей, приведенных в таблице 1, не дает однозначный ответ о варианте исполнения инженерных систем с позиции застройщика. Для решения этой задачи также используем метод DEA. Для анализа энергоэффективности сформируем на основе методологии DEA модель обобщенной оценки варианта исполнения инженерных систем жилого дома с позиции застройщика в виде функционала, отвечающего минимизации расходов энергоресурсов и капитальных затрат:

$$f_n = \max_{v_1, v_2, v_3 \in G} \frac{1}{v_{1n} \cdot B_n + v_{2n} \cdot q_n + v_{3n} \cdot k_n} \quad (5)$$

с ограничениями на  $v_{1n}, v_{2n}, v_{3n}$ , аналогичными ранее применяемыми (2), (4):

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_{1_1} \cdot B_1 + v_{2_1} \cdot q_1 + v_{3_1} \cdot k_1} &\leq 1 \\ \frac{1}{v_{1_2} \cdot B_2 + v_{2_2} \cdot q_2 + v_{3_2} \cdot k_2} &\leq 1 \\ \dots\dots\dots & \\ \frac{1}{v_{1_6} \cdot B_6 + v_{2_6} \cdot q_6 + v_{3_6} \cdot k_6} &\leq 1 \\ v_{1_n}, v_{2_n}, v_{3_n} &> 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Результаты расчета показателей сравнительной энергоэффективности по (5), (6) с позиции застройщика представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Показатели сравнительной эффективности исполнения инженерных систем жилого дома с позиций: 1 – потребителя; 2 – застройщика; 3 – государства

Максимальное значение сравнительной эффективности энергоснабжения с учетом капитальных затрат ( $f=1$ ) у варианта 1. Высокий показатель сравнительной эффективности обусловлен минимальным значением капитальных затрат.

Самый низкий показатель сравнительной эффективности у варианта 5 ( $f=0,79$ ) и 2 ( $f=0,84$ ), когда отопление и горячее водоснабжение осуществляется от крышных котельных. Низкие значения показателей сравнительной эффективности объясняются высокими капитальными затратами. У вариантов 3, 4, 6 значения сравнительной эффективности близки к максимальному ( $f=0,94 \div 0,96$ ). Из анализа значений весовых коэффициентов следует вывод, что наибольшее влияние на значение функционала эффективности имеет показатель удельных капитальных затрат. Таким образом решение задач (9), (10) позволило ранжировать рассматриваемые варианты исполнения инженерных систем жилого дома с позиции застройщика. В совокупности проведенные оценки, что оценки вариантов энергообеспечения с различных позиций показали, что они приводят к разным оптимальным решениям и не дают однозначного ответа о варианте энергообеспечения жилого дома, удовлетворяющего все три стороны.

На заключительном этапе исследования проведем оценку варианта энергообеспечения жилого дома по совокупности всех четырех показателей, представленных в таблице 1. Согласно методу DEA сформируем функционал обобщенной интегральной оценки энергоэффективности варианта исполнения инженерных систем жилого дома, отвечающий минимизации взвешенной суммы затрат по всем входным составляющим:

$$f_n = \max_{v_1, v_2, v_3 \in G} \frac{1}{v_{1n} \cdot B_n + v_{2n} \cdot q_{wn} + v_{3n} \cdot k_n + v_{4n} \cdot p_n} \quad (7)$$

и систему ограничений в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_{1_1} \cdot B_1 + v_{2_1} \cdot q_{w1} + v_{3_1} \cdot k_1 + v_{4_1} \cdot p_1} &\leq 1 \\ \frac{1}{v_{1_2} \cdot B_2 + v_{2_2} \cdot q_{w2} + v_{3_2} \cdot k_2 + v_{4_2} \cdot p_2} &\leq 1 \\ \dots\dots\dots & \\ \frac{1}{v_{1_6} \cdot B_6 + v_{2_6} \cdot q_{w6} + v_{3_6} \cdot k_6 + v_{4_6} \cdot p_6} &\leq 1 \\ v_{1_n}, v_{2_n}, v_{3_n}, v_{4_n} &> 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Результаты расчета показателей сравнительной интегральной энергоэффективности по (7) и (8) представлены на рис. 2. Максимальное значение интегрального показателя энергоэффективности ( $f=1$ ) имеет вариант 5, что коррелирует с оценкой энергоснабжения жилого дома с позиции потребителя. У других вариантов значения интегральной эффективности находятся в диапазоне ( $f=0,9\div 0,95$ ).

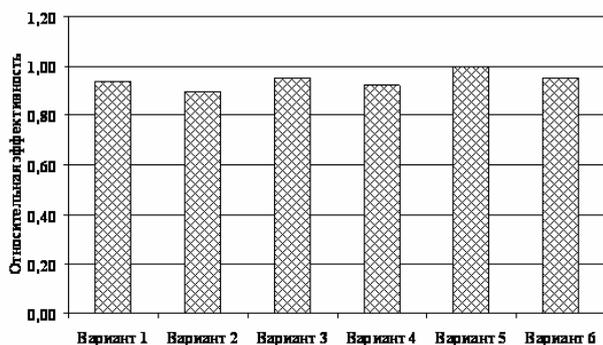


Рис. 2. Интегральный показатель сравнительной эффективности исполнения инженерных систем жилого дома

**Выводы:** на основе системного анализа и многокритериального оценивания предложен подход, позволивший исследовать проблему эффективности энергообеспечения многоэтажного жилого дома с позиций потребителя, государства, застройщика и общесистемной точки зрения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный Закон РФ от 23.11.2009 №261-ФЗ: // Рос. газ. от 27 ноября 2009 г.
2. Посашков, М.В. Оценка эффективности энергопотребления жилого дома на стадии проектирования / М.В. Посашков, В.И. Немченко // Повышение энергоэффективности зданий и сооружений. Межвузовский сборник научных трудов. Самара: СамГАСУ, 2010. Вып. 4. С. 11-16.
3. Дилигенский, Н.В. Построение и идентификация математических моделей производственных систем / Н.В. Дилигенский, А.А. Гаврилова, М.В. Цепенко. – Самара: «ОФОРТ», 2005. 126 с.

## THE SYSTEM ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF DESIGN DECISIONS OF POWER SUPPLY IN THE RESIDENTIAL BUILDING AT MODERN BUILDING TECHNOLOGIES

© 2010 N.V. Diligenskiy, V.I. Nemchenko, M.V. Posashkov

Samara State Technical University

On the basis of system analysis principles the approach at the choice of optimum variant of performance the systems of heat-, gas-, water- and electrosupply of a designed apartment house from a position of the consumer, the builder and the state is developed. The analysis of comparative efficiency was spent on the basis of DEA methodology. The estimation of generalized integral power efficiency at variants of performance the engineering systems of a multi-storey apartment house is made.

Key words: *power efficiency, design, system analysis, DEA method, mathematical model, weight coefficient, integral estimation*

*Nikolay Diligenskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Control and System Analysis in Heat Power Engineering.*

*E-mail: usat@samgtu.ru*

*Vladimir Nemchenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Control and System Analysis in Heat Power Engineering.*

*E-mail: nemchenko\_vi@mail.ru*

*Mikhail Posashkov, Post-graduate Student. E-mail: posashkovmv@svgc.ru*