



Методология оценки энергоэффективности инженерных систем жилого дома с учётом целевых функций

Введение

При проектировании объектов жилого фонда используются современные технологии, которые позволяют смоделировать любой вариант исполнения здания и инженерных систем, обеспечивающих его энергоресурсами во время всего жизненного цикла. Часто строительная компания, которая, согласно Федеральному закону от 30 декабря 2004 года №214-ФЗ «Об участии в долевом строительстве многоквартирных домов...» [1], должна в течение пяти лет нести гарантийные обязательства на построенный объект, выбирает самый выгодный по себестоимости вариант исполнения зданий, в том числе и инженерных систем. При этом покупатель на рынке жилой недвижимости руководствуется минимальной стоимостью квартиры. При приёмке Госкомиссией вновь построенного жилого здания [2] строительная компания оформляет энергетический паспорт, который отражает класс энергоэффективности и количество потребляемой тепловой энергии [3].

Ни на одном из рассматриваемых этапов ни одна из сторон, участвующих в процессе проектирования, строительства, приёмки и приобретения строения, не рассматривает возможные варианты моделирования здания и его инженерных систем с позиции последующей эксплуатации и энергоэффективности. Поэтому

при проектировании жилого здания необходимо учитывать целевые функции строительной организации (далее — «застройщик»), покупателя (далее — «потребитель») и госструктур, отвечающих за рациональное и качественное использование невозобновляемых энергоресурсов (далее — «органы власти»).

Целевые функции отвечают следующим потребностям: застройщика — минимизация общих капитальных затрат на строительство здания; потребителя — минимизация будущих эксплуатационных затрат на коммунальные услуги и оплат за тепловую и электрическую энергию; органов власти — рациональное использование энергоресурсов и проведение мероприятий по энергосбережению

Стороны, участвующие в процессе проектирования, строительства, приёмки и приобретения строения, не рассматривают возможные варианты моделирования здания и его инженерных систем с позиции последующей эксплуатации и энергоэффективности. При проектировании жилого здания необходимо учитывать целевые функции строительной организации, покупателя и госструктур

Рецензия эксперта на статью получена 09.07.2019 [Expert review on the article received on July 9, 2019].

УДК 519.816; 620.9.004.18. Научная специальность: 05.23.03.

Методология оценки энергоэффективности инженерных систем жилого дома с учётом целевых функций

Михаил В. Посашков, к.т.н.; Владимир И. Немченко, к.т.н., доцент, Самарский государственный технический университет (СамГТУ)

Руководствуясь принципами системного анализа, авторы разработали подход к выбору наилучшего варианта исполнения систем энергоснабжения проектируемого жилого дома с учётом целевых функций застройщика, потребителя и органов власти. Анализ сравнительной эффективности различных вариантов инженерных систем проводился на основе методологии DEA. Получены оценки вариантов исполнения инженерных систем жилого дома с позиций застройщика, потребителя, органов власти и с учётом обобщённой интегральной энергоэффективности, учитывающей совокупность интересов всех заинтересованных сторон.

Ключевые слова: инженерные системы, целевая функция, энергоэффективность, метод многокритериального оценивания.

UDC 519.816; 620.9.004.18. The number of scientific specialty: 05.23.03.

Methodology of assessment of energy efficiency of engineering systems of the house taking into account target functions

Mihail V. Posashkov, PhD; Vladimir I. Nemchenko, PhD, Associate Professor, Samara State Technical University (Samara Polytech)

Guided by the principles of systems analysis, an approach at the choice of the best option of execution of systems of power water supply, the projected house taking into account objective functions of the builder, consumer and authorities is developed. The analysis of comparative effectiveness of various options of engineering systems was carried out on the basis of methodology of DEA. Estimates of options of execution of engineering systems of a house from positions of the builder, consumer, authorities and taking into account the generalized integrated energy efficiency considering set of interests of all interested parties are received.

Key words: engineering systems, objective function, energy efficiency, multi-criteria estimation method.



Для перечисленных вариантов исполнения инженерных систем рассматриваемого многоэтажного многоквартирного здания необходимо сформировать целевые функции, отражающие приоритеты потребителя, застройщика и органов власти. Целевая функция потребителя должна обеспечивать минимальные эксплуатационные платежи при достаточном объёме энергоресурсов [3].

Целевая функция застройщика в отношении инженерных систем должна обеспечивать наибольшую прибыль, обратным образом зависящую от капитальных затрат на сооружение инженерных систем дома с требуемым энергообеспечением. Целевая функция органов власти направлена на обеспечение минимального интегрального потребления всех видов энергоресурсов [3].

и повышению энергетической эффективности в соответствии с Федеральным законом от 23 ноября 2009 года №261-ФЗ «Об энергосбережении...». Данный федеральный закон приоритетным направлением определяет энергоэффективность вновь возводимых и реконструируемых домов, а также ежегодное снижение энергопотребления при эксплуатации [3].

Целью настоящей работы является разработка методологии оценки энергоэффективности инженерных систем проектируемого жилого дома с учётом целевых функций потребителя, органов власти и застройщика.

Анализ альтернатив

На примере многоквартирного жилого дома, расположенного в Самаре, рассмотрена задача выбора варианта исполнения инженерных систем при условии наличия развитой инфраструктуры. Выполнен комплексный анализ наиболее распространённых в многоэтажных зданиях вариантов исполнения инженерных систем:

- **вариант 1** — отопление и горячее водоснабжение (далее — ГВС) централизованное от тепловой сети, кухни с газовыми плитами;
- **вариант 2** — отопление и ГВС от котлов-колонок на газообразном топливе, кухни с газовыми плитами;
- **вариант 3** — отопление и ГВС от крышной котельной на газообразном топливе, кухни с газовыми плитами;
- **вариант 4** — отопление и ГВС централизованное от тепловой сети, кухни с электрическими плитами;
- **вариант 5** — отопление и ГВС от котлов-колонок на газообразном топливе, кухни с электроплитами;
- **вариант 6** — отопление и ГВС от крышной котельной на газообразном топливе, кухни с электроплитами.

Критерии для вариантов исполнения инженерных систем жилого дома

табл. 1

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



При анализе и выборе варианта исполнения инженерных систем жилого дома учитывались следующие критерии:

- удельные эксплуатационные платежи p на квадратный метр отапливаемой площади, тыс. руб/м²;
- удельные капитальные затраты k на создание инженерных сетей на квадратный метр отапливаемой площади, тыс. руб/м²;
- удельный расход газа B на квадратный метр отапливаемой площади, м³/(м²·год);
- удельный среднегодовой расход воды q_w на хозяйственно-питьевые нужды на квадратный метр отапливаемой площади, м³/(м²·год).

Выбор и расчёт критериев выполнялся в соответствии с действующими нормами и подробно представлен в работе [4].

В табл. 1 приведены значения критериев для шести рассматриваемых вариантов инженерных систем жилого дома.

Оценка варианта исполнения инженерных систем дома с учётом целевой функции потребителя

Оценка проводилась по трём показателям: удельным эксплуатационным платежам p , удельному расходу холодной воды q_w и удельному расходу газа B , которые должны быть минимальными. Из табл. 1 видно, что удельные эксплуатационные платежи минимальны у варианта 5 — 340 руб/м². Минимальный удельный расход холодной воды у вариантов 1 и 4 — 2,94 м³/(м²·год). У варианта 5 также наименьший расход газа — 68,8 м³/(м²·год), такой же, как у варианта 2, но больший, чем у варианта 4 расход холодной воды — 3,85 м³/(м²·год). Анализ частных критериев, приведённых в табл. 1, не даёт однозначного ответа о варианте исполнения инженерных систем жилого дома, наилучшего с позиции потребителя.

Для решения этой задачи используем метод многокритериального оценивания обобщённой сравнительной эффективности — Data Envelopment Analysis (DEA) [5]. Метод DEA основан на решении задач математического программирования и исключает фактор субъективности. Это позволяет использовать его при анализе сложных систем с разнородными входными и выходными характеристиками. Построение математических моделей с системой ограничения, определяющей весовые коэффициенты каждого критерия, и последующие их решения дают значения обобщённых показателей сравнительной эффективности. Объекты с максимальным показателем эффективности (1,0) формируют эффективный фронт. Объекты, лежащие на этой границе, являются наиболее эффективными.

Для анализа сравнительной эффективности инженерных систем жилого дома с позиции потребителя на основе методологии DEA формируем целевую функцию — модель обобщённой оценки f_n n -го варианта исполнения инженерных систем жилого дома в виде следующего функционала, отвечающего минимизации эксплуатационных платежей и расходов энергоресурсов:

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

где v_{1n} , v_{2n} и v_{3n} — положительные весовые коэффициенты, характеризующие относительный вклад каждого из частных показателей — B_n , q_{wn} и p_n в показатель сравнительной эффективности f_n для n -го варианта исполнения инженерных систем.

Расчёт численных показателей комплексной энергоэффективности, то есть

Для анализа сравнительной эффективности инженерных систем жилого дома на основе DEA формируем целевую функцию — модель обобщённой оценки n -го варианта исполнения инженерных систем жилого дома в виде следующего функционала, отвечающего минимизации эксплуатационных платежей и расходов энергоресурсов

величин 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 весовых коэффициентов $G \in (v_{1n}, v_{2n}, v_{3n})$ в функционале (1), записывается следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{1}{v_{11}B_1 + v_{21}q_{w1} + v_{41}p_1} \leq 1 \\ \frac{1}{v_{12}B_2 + v_{22}q_{w2} + v_{42}p_2} \leq 1 \\ \dots \\ \frac{1}{v_{16}B_6 + v_{26}q_{w6} + v_{46}p_6} \leq 1 \\ v_1, v_2, v_4 > 0 \end{cases}, \quad (2)$$

Система соотношений (1) и (2) для рассматриваемых вариантов исполнения инженерных систем определяет шесть нелинейных задач математического программирования. Решение каждой задачи даёт значение показателя сравнительной эффективности варианта исполнения инженерных систем f_n с позиции потребителя. Результаты решения задачи (1) и (2) графически представлены на рис. 1. Максимальное значение показателя сравнительной эффективности у варианта 5 ($f = 1$), характеризующегося минимальными значениями удельных эксплуатационных платежей и удельного расхода газа, но при незначительном превышении, по сравнению с другими вариантами, расхода холодной воды. Минимальные значения показателя — у варианта 1 ($f = 0,87$) и варианта 4 ($f = 0,9$), что коррелирует с высокими значениями их эксплуатационных затрат. У остальных вариантов значения показателей сравнительной эффективности инженерных систем примерно одинаковы ($f = 0,95$ – $0,96$).

Таким образом, решение задач (1) и (2) позволило оценить и выявить наилучший вариант исполнения инженерных систем жилого дома непосредственно с позиции потребителя.

Анализ значений весовых коэффициентов показал, что наибольшее значение имеет критерий удельных эксплуатационных затрат, который оказал наибольшее влияние на величину функционала при решении шести задач нелинейного математического программирования по формулам (1) и (2).

Оценка варианта исполнения инженерных систем дома с учётом целевой функции органов власти

На следующем этапе проведена оценка наилучшего варианта исполнения инженерных систем проектируемого жилого дома с позиции органов власти. Выбор наилучшего варианта проводился по двум критериям: удельному потреблению воды q_w и расходу газа B . С позиции органов власти [3] инженерные системы здания должны обеспечить минимальный интегральный расход энергоресурсов.

Численные значения критериев расхода энергоресурсов представлены в табл. 1. Удельный расход холодной воды минимален у вариантов 1 и 4. Удельный расход газа минимален у вариантов 2 и 5. Анализ критериев, приведённых в табл. 1, не даёт однозначного ответа о варианте исполнения инженерных систем с позиции органов власти. Поэтому для оценки систем энергообеспечения жилого дома используем метод Data Envelopment Analysis, как и в предыдущей задаче.

В соответствии с методологией DEA сформирована целевая функция — модель обобщённой оценки энергоэффективности f_n n -го варианта исполнения инженерных систем жилого дома с позиции органов власти в виде:

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

Далее аналогично (2) для каждого оцениваемого варианта исполнения инженерных систем формируем систему ограничений с областью значений

$$G \in (v_{1n}, v_{2n}).$$

Решение шести задач нелинейного математического программирования определяет значения показателей сравнительной эффективности каждого варианта. Результаты расчёта представлены на рис. 1. Из данного рисунка видно, что самые низкие значения показателя сравнительной энергоэффективности у вариантов 3 и 6 ($f = 0,46$), что отвечает высокому потреблению холодной воды. Максимальный показатель сравнительной энергоэффективности у вариантов 1 и 4 ($f = 1$), что соответствует наименьшим расходам холодной воды. У вариантов 2 и 5 значение показателя сравнительной энерго-

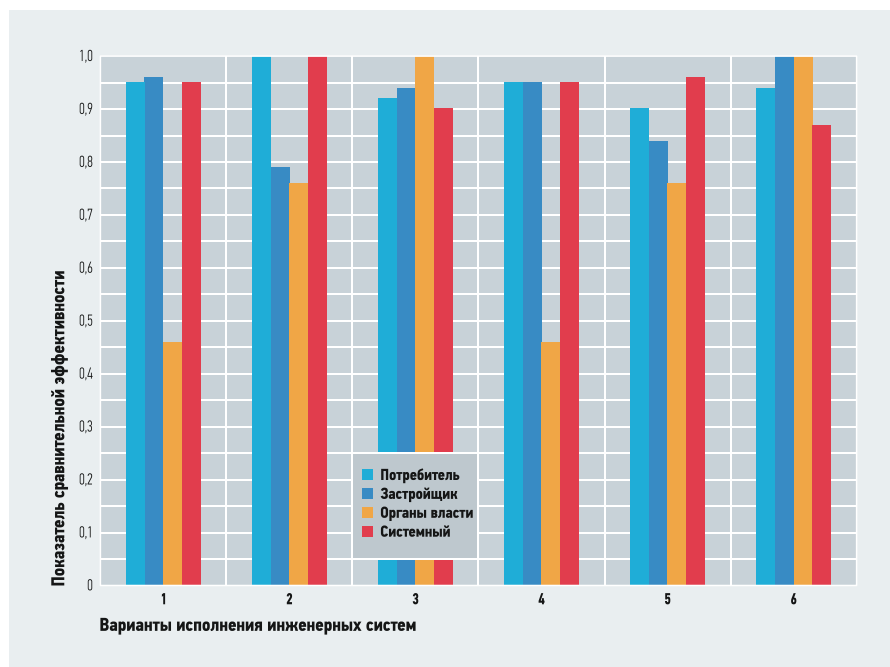


Рис. 1. Сравнительная эффективность вариантов исполнения инженерных систем жилого дома с учётом целевых функций (1 — потребителя; 2 — застройщика; 3 — органов власти; 4 — системной)

эффективности составляет ($f = 0,76$), что объясняется повышенным расходом холодной воды. Наибольшее влияние на значение функционала (3) оказывает величина расхода холодной воды, что следует из анализа весовых коэффициентов. Решение задачи (3) позволило ранжировать рассматриваемые варианты исполнения инженерных систем жилого дома с учётом их энергоэффективности, отвечающей целевой функции органов власти.

Оценка варианта исполнения инженерных систем дома с учётом целевой функции застройщика

Для оценки варианта исполнения инженерных систем жилого дома с учётом целевой функции застройщика используем три критерия: удельные капитальные затраты — k , удельный расход газа — B и удельный расход холодной воды — q_w , значения которых представлены в табл. 1. Из данной таблицы видно, что удельные капитальные затраты минимальны у варианта 1 (1540 руб/м²); удельный расход газа самый низкий у вариантов 2 и 5; расход холодной воды наименьший у вариантов 1 и 4. Анализ критериев, приведённых в табл. 1, не даёт однозначный ответ о наилучшем, с позиции застройщика, варианте исполнения инженерных систем. Для решения этой задачи также используем метод DEA.

Согласно методологии DEA сформируем целевую функцию застройщика в виде функционала, отвечающего минимизации расходов всех энергоресурсов и капитальных затрат:

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

причём в данной формуле справедливы ограничения на v_{1n} , v_{2n} и v_{3n} , аналогичные используемым ранее (2).

Полученные результаты расчёта показателей сравнительной эффективности по (4), с позиции застройщика, представлены на рис. 1.

Самый низкий показатель сравнительной эффективности у вариантов 5 ($f = 0,79$) и 2 ($f = 0,84$), когда отопление и горячее водоснабжение осуществляется от котлов-колонок. Низкие значения показателей сравнительной эффективности обусловлены высокими удельными капитальными затратами.

У вариантов 3, 4 и 6 значения сравнительной эффективности близки к максимальному ($f = 0,94$ – $0,96$).

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

Анализ весовых коэффициентов показал, что наибольшее влияние на величину функционала (4) имеет критерий удельных капитальных затрат.

Таким образом, решение задачи (4) позволило ранжировать рассматриваемые варианты исполнения инженерных систем жилого дома с учётом целевой функции застройщика.

Проведённые оценки вариантов исполнения инженерных систем жилого дома с учётом трёх целевых функций показали, что получены разные оптимальные решения, не дающие однозначного ответа о организации системы энергообеспечения жилого дома, которая удовлетворяла бы одновременно все заинтересованные стороны.

Многокритериальная системная оценка вариантов исполнения инженерных систем жилого дома по совокупности частных критериев

На заключительном этапе исследования проведена оценка варианта энергообеспечения многоквартирного жилого дома по совокупности всех четырёх показателей, приведённых в табл. 1.

Сформирован функционал обобщённой интегральной оценки варианта исполнения инженерных систем жилого дома, согласно методу DEA, отвечающий минимизации взвешенной суммы затрат по всем входным критериям:

$$f_n = \max_{v_1, v_2, v_3 \in G} \left(\frac{1}{v_{1n} B_n + v_{2n} q_{wn} + v_{3n} k_n + v_{4n} p_n} \right), \quad (5)$$

и систему ограничений в виде, аналогичном (2), с ограничениями на v_{1n} , v_{2n} , v_{3n} и v_{4n} . Результаты расчёта обобщённых показателей сравнительной интегральной эффективности по (5) показаны на рис. 1.

Максимальное значение интегрального показателя энергоэффективности ($f = 1$) имеет вариант 5 — отопление и горячее водоснабжение от котлов-колонок, кухни с электрическими плитами, что коррелирует с оценкой исполнения инженерных систем жилого дома с позиции потребителя. У других вариантов значения интегральной эффективности находятся в диапазоне ($f = 0,9$ – $0,95$).

Заключение

На основе системного анализа и многокритериального оценивания предложена методология оценки эффективности инженерных систем, позволившая на стадии проектирования исследовать проблему выбора варианта энергоснабжения жилого дома с учётом целевых функций потребителя, органов власти, застройщика и общесистемной энергоэффективности, учитывающей интересы всех сторон. ●

1. Об участии в долевом строительстве многоквартирных домов и иных объектов недвижимости и о внесении изменений в некоторые законодательные акты Российской Федерации: Фед. закон от 30.12.2004 №214-ФЗ // Российская газета, №3669 от 31.12.2004.
2. Градостроительный кодекс Российской Федерации: Фед. закон от 29.12.2004 №190-ФЗ // Российская газета, №3668 от 30.12.2004.
3. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Фед. закон от 23.11.2009 №261-ФЗ // Российская газета, №5050 от 27.11.2009.
4. Посашков М.В., Немченко В.И. Оценка эффективности энергопотребления жилого дома на стадии проектирования / Повышение энергоэффективности зданий и сооружений: Межвуз. сб. науч. трудов. Вып. 4. — Самара: СамГАСУ, 2010. С. 11–16.
5. Дилигенский Н.В., Гаврилова А.А., Цапенко М.В. Построение и идентификация математических моделей производственных систем. — Самара: Офорт, 2005. 126 с.

References — see page 93.

Methodology of assessment of energy efficiency of engineering systems of the house taking into account target functions. Pp. 50–53.

Mihail V. Posashkov, PhD; **Vladimir I. Nemchenko**, PhD, Associate Professor, Samara State Technical University (Samara Polytech, Samara city)

1. *Ob uchastii v dolevom stroitel'stve mnogokvartirnyh domov i inyh ob#ektov nedvizhimosti i o vnesenii izmenenij v nekotorye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii: Fed. zakon ot 30.12.2004 №214-FZ* [About participation in share construction of apartment houses and other real estate objects and about modification of some legal acts of the Russian Federation: Federal Law No. 214-FL of December 12, 2004]. *Rossijskaja Gazeta* [The Newspaper of Russia]. Issue No. 3669 of December 31, 2004. [In Russian]
2. *Gradostroitel'nyj kodeks Rossijskoj Federacii: Fed. zakon ot 29.12.2004 №190-FZ* [The Town-Planning Code of the Russian Federation: Federal Law No. 190-FL of December 29, 2004]. *Rossijskaja Gazeta* [The Newspaper of Russia]. Issue No. 3668 of December 30, 2004. [In Russian]
3. *Ob jenergosberezhenii i o povyshenii jenergeticheskoj jeffektivnosti, i o vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii: Fed. zakon ot 23.11.2009 №261-FZ* [About energy saving and about increase of power efficiency, and about modification of some legal acts of the Russian Federation: Federal Law No. 261-FL of November 23, 2009]. *Rossijskaja Gazeta* [The Newspaper of Russia]. Issue No. 5050 of November 27, 2009. [In Russian]
4. Posashkov M. V., Nemchenko V. I. *Ocenka jeffektivnosti jenerGOPotreblenija zhilogo doma na stadii proektirovanija* [Evaluation of the energy efficiency of a residential building at the design stage]. *Povyshenie jenerGOjeffektivnosti zdaniy i sooruzhenij: Mezhvuz. sb. nauch. trudov. Vyp. 4* [Improving the energy efficiency of buildings and structures: Interuniversity coll. vol. of scientific papers. Issue 4]. Samara. *SamGASU* [Samara State Technical University (Samara Polytech)]. 2010. Pp. 11–16. [In Russian]
5. Diligenskij N. V., Gavrilova A. A., Capenko M. V. *Postroenie i identifikacija matematicheskikh modelej proizvodstvennyh sistem* [Construction and identification of mathematical models of production systems]. Samara. "Ofort" ["Ofort" (Etching), LLC]. 2005. 126 p. [In Russian]