

О критериях эффективности систем теплоснабжения при их реконструкции

Рецензия эксперта на статью получена 22.04.2025 [The expert review of the article was received on April 22, 2024]

Повышение энергоэффективности систем теплоснабжения является важной задачей для снижения энергопотребления и минимизации воздействия на окружающую среду. Комплексный подход к повышению энергоэффективности систем теплоснабжения может значительно снизить эксплуатационные расходы и улучшить экологическую ситуацию [1–2]. Техническое состояние систем теплоснабжения требует особого внимания и быстрого решения накопившихся проблем. Возможные направления для улучшения ситуации приведены в [3–5].

Оценка эффективности систем теплоснабжения включает в себя множество критериев [1, 6–8], которые можно разделить на несколько групп. К основным критериям относят следующие.

1. Технические критерии:

- коэффициент полезного действия (КПД) показывает, насколько эффективно данная конкретная система преобразует топливо в тепло;
- надёжность — частота и продолжительность аварий и отключений;
- скорость реакции — время, необходимое для достижения заданной температуры после изменения нагрузки;
- гибкость — возможность адаптации к изменяющимся условиям внешней среды и требованиям потребителей.

2. Экономические критерии:

- себестоимость тепловой энергии — анализ затрат на производство, транспортировку и распределение тепла;
- инвестиционные затраты — первоначальные затраты на строительство и модернизацию системы;
- операционные затраты — текущие расходы на эксплуатацию и обслуживание системы;
- экономическая эффективность — соотношение затрат и получаемых экономических выгод.

Помимо основных, выделяют ещё и сопутствующие критерии, такие как:

- экологические критерии, включающие в себя уровень выбросов твёрдых частиц, углекислого газа и других загрязняющих веществ в атмосферу, а также использование возобновляемых источников энергии, а именно долю тепла, вырабатываемого возобновляемыми источниками;
- социальные критерии, то есть удовлетворённость потребителей температурным режимом и качеством теплоснабжения, обеспечение доступа к услугам теплоснабжения для всех категорий населения, включая социально незащищённые группы, уровень рисков, связанных с эксплуатацией системы, включая возможность аварий и их последствия;

Оценка эффективности систем теплоснабжения включает в себя множество критериев, которые можно разделить на несколько групп. Основные критерии: технические (коэффициент полезного действия, надёжность, скорость реакции и гибкость) и экономические (себестоимость тепловой энергии, инвестиционные и операционные затраты, экономическая эффективность)

- организационные критерии, включающие эффективность управления системой теплоснабжения, уровень внедрения современных технологий и автоматизированных систем управления, доступность информации о функционировании системы для пользователей.

Только в результате комплексного анализа данных критериев можно получить полное представление об эффективности систем теплоснабжения, а также выявить возможные пути для их повышения.

УДК 697.33. Научная специальность: 2.1.3.

О критериях эффективности систем теплоснабжения при их реконструкции

Н. П. Краснова, старший преподаватель; [Ю. И. Рахимова](#), к.п.н., доцент; А. С. Горшенин, к.т.н., доцент, кафедра «Промышленная теплоэнергетика», Самарский государственный технический университет (СамГТУ)

В статье рассматриваются критерии эффективности при реконструкции систем теплоснабжения. Приводится оценка мероприятий по энергосбережению. Даны технические и экономические критерии эффективности по годам внедрения мероприятий и достижения их срока окупаемости.

Ключевые слова: энергосбережение, энергоэффективность, система теплоснабжения, коэффициент полезного действия, критерии эффективности, выбор мероприятий, потери энергии.

UDC 697.33. The number of scientific specialty: 2.1.3.

On the criteria of efficiency of heat supply systems during their reconstruction

N. P. Krasnova, senior lecturer; [Yu. I. Rakhimova](#), PhD, Associate Professor; A. S. Gorshenin, PhD, Associate Professor, the Department of Industrial Thermal Power Engineering, Samara State Technical University (SamSTU)

The article examines the criteria of efficiency in the reconstruction of heat supply systems. An assessment of energy saving measures is given. Technical and economic criteria of efficiency are given by years of implementation of measures and achievement of their payback period.

Key words: energy saving, energy efficiency, heat supply system, efficiency, efficiency criteria, choice of measures, energy losses.

1. Оценка эффективности мероприятий

В качестве критерия оценки эффективности мероприятий по реконструкции систем теплоснабжения можно принять удельные финансовые затраты на единицу сэкономленной теплоты.

В годовом разрезе:

$$K_i = \frac{3_i}{\Delta Q_{\text{выр},i}};$$

$$\Delta Q_{\text{выр},i} = Q_{\text{выр},i-1} - Q_{\text{выр},i},$$

где 3_i — затраты, руб.; $\Delta Q_{\text{выр},i}$ — сэкономленная тепловая энергия, Гкал.

За весь период реализации мероприятий по реконструкции систем теплоснабжения:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m 3_i}{\sum_{i=1}^n \Delta Q_{\text{выр},i}}, \text{ руб./Гкал,}$$

где n — количество лет реализации мероприятий до срока окупаемости; m — количество лет финансирования реализации мероприятий.

Очевидно, что $n > m$.

Если затраты отнесены к годовой экономии теплоты, то критерий K будет выражаться следующим образом:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m 3_i}{\Delta Q_{\text{выр},i}}, \text{ руб./Гкал,}$$

Величина $Q_{\text{выр},i-1}$ представляет собой выработку теплоты в котельной установке до проведения мероприятий по реконструкции системы теплоснабжения, а величина $Q_{\text{выр},i}$ — после реконструкции.

На выработку этого количества теплоты потребуется расход топлива:

$$B_{i-1} = b_{i-1} Q_{\text{выр},i-1};$$

$$B_i = b_i Q_{\text{выр},i},$$

где b_{i-1} и b_i — удельный расход топлива на выработку до и после реконструкции, кг у.т./Гкал.

В зависимостях выше вместо величины $Q_{\text{выр}}$ может фигурировать величина доставленной потребителям теплоты $Q_{\text{дост}}$ и величина расхода топлива на котельную установку B . Выбор данного показателя зависит от конкретного случая, однако результирующим итогом этого выбора будет снижение (увеличение) расхода топлива на источник теплоснабжения (на всю систему):

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m 3_i}{\sum_{i=1}^n B_i}, \text{ руб./т.у.т.}$$

Рассмотрим баланс системы «Источник (ист) — Тепловая сеть (ТС) — Потребитель теплоты (потр)».

Величины $Q_{\text{пол}}^{\text{потр}}$ и $Q_{\text{пот}}^{\text{потр}}$ являются нормированной величиной и величиной, определяемой состоянием сооружения и его эксплуатацией, соответственно.



То есть эти величины не определяются состоянием системы, но требуют своего обеспечения тем больше, чем старше сооружение и ниже уровень его эксплуатации, что определяет тепловую нагрузку системы «Источник (ист) — Тепловая сеть (ТС)».

Учитывая изложенное выше, запишем тепловой баланс как:

$$B Q_{\text{н}}^{\text{р}} = Q_{\text{осевш}} + Q_{\text{уг}}^{\text{ист}} + Q_{\text{пот}}^{\text{ист}} + Q_{\text{пот}}^{\text{ТС}},$$

где $Q_{\text{осевш}} = Q_{\text{пол}}^{\text{потр}} + Q_{\text{пот}}^{\text{потр}} = Q_{\text{дост}}$ — теплота, осевшая у потребителя (доставленная потребителю).

Очевидно, что величина $Q_{\text{осевш}}$ практически соответствует величине $Q_{\text{дост}}$ и меньше её только на величину потерь теплоты в ЦТП, которые можно отнести к потерям теплоты у потребителя.

Очевидно также, что величина выработанной на источнике теплоты равна:

$$Q_{\text{выр}} = Q_{\text{дост}} + Q_{\text{пот}}^{\text{ТС}}.$$

Принимая постоянным количество осевшей (доставленной) теплоты:

$$\Delta Q_{\text{выр},i} = Q_{\text{выр},i-1} - Q_{\text{выр},i} = Q_{\text{выр},i-1}^{\text{ТС}} - Q_{\text{выр},i}^{\text{ТС}}.$$

Таким образом, в рассмотренном случае экономия тепловой энергии будет определяться только потерями теплоты тепловой сетью, а соответствующие коэффициенты будут равны:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m 3_i}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{пот},i-1}^{\text{ТС}} - Q_{\text{пот},i}^{\text{ТС}})}, \text{ руб./Гкал.}$$

2. Технические критерии эффективности

Расчётная формула для определения критериев эффективности K_i в последовательности от потребителя до источника:

$$K_i^q = \frac{\sum_{i=1}^m 3_i}{\sum_{i=1}^n \Delta Q_i}.$$

Отношение $3_i/Q_{i-1}$ показывает удельные затраты на единицу теплоты до проведения мероприятий по реализации

энергосбережения, а всё соотношение — на единицу сэкономленной теплоты.

Величины Q могут быть представлены следующим образом:

$$Q_{\text{дост}} = G_{\text{дост}} i_{\text{дост}}; Q_{\text{выр}} = G_{\text{выр}} i_{\text{выр}},$$

и, следовательно, определяются как расходом теплоносителя G , так и его тепло-содержанием i , соответствующие величины $Q_{\text{дост}}$ и $Q_{\text{выр}}$ — потерями (экономией) как теплоносителя, так и теплоты. Поэто-

му для всестороннего анализа эффективности системы «Источник — Тепловая сеть — Потребитель теплоты» необходим полный учёт расходов теплоносителя, его температуры и количества теплоты.

Экономия (перерасход) доставленной теплоты может быть представлена как:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{дост},i} &= (G_i) i_i - (G_{i-1}) i_{i-1} = \\ &= [(G_i - G_{i-1}) i_i]_{\text{дост}} + [(i_i - i_{i-1}) G_{i-1}]_{\text{дост}}; \\ \Delta Q_{\text{выр},i} &= \\ &= [(G_i - G_{i-1}) i_i]_{\text{выр}} + [(i_i - i_{i-1}) G_{i-1}]_{\text{выр}}. \end{aligned}$$

В данной зависимости первый член суммы показывает экономию (перерасход) теплоты в результате снижения (увеличения) утечек теплоносителя, второй член — экономию (перерасход) теплоты в результате тепловых потерь.

Вопрос, связанный с системой регулирования теплоснабжения — «количественной», «качественной» или «смешанной» — специально не рассматривается. Подчеркнём лишь, что централизованное «количественное» регулирование теплоснабжения целесообразно при малых длинах теплотрасс, а «качественное» — при качественной теплоизоляции теплопроводов. При низкой гидравлической плотности теплопроводов «количественное» регулирование практически невозможно. При низкой тепловой герметичности теплотрасс «качественное» регулирование также невозможно. С точки зрения затрат на транспорт теплоносителя «качественное» регулирование предпочтительнее.

Приведённые зависимости для критериев эффективности определяют удельные затраты на единицу сэкономленной теплоты. Максимальные удельные затраты будут при минимальных объёмах экономии тепла (топлива), а обратная величина $(K_i - 1)/K_i$ показывает объём экономии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на рубль затрат.

При отсутствии энергосбережения удельные затраты (независимо от объёма) бесконечно велики, а обратная величина объёма экономии на рубль затрат равна нулю — это, как правило, затраты на обеспечение техники безопасности, приборной техники, автоматики, организационных мероприятий, условий эксплуатации.

При отсутствии экономии энергии у потребителя $Q_{\text{дост},i} = Q_{\text{дост},i-1}$ коэффициент эффективности равен:

$$K_{\text{выр},i}^q = \frac{3_i}{Q_{\text{выр},i-1} \left(1 - \frac{q_i^{\text{TC}}}{q_{i-1}^{\text{TC}}}\right)} = \frac{3_i}{Q_{\text{выр},i-1} \left(1 - \frac{\eta_{i-1}^{\text{TC}}}{\eta_i^{\text{TC}}}\right)},$$

то есть определяется только экономией энергии на теплотрассе.

При отсутствии экономии энергии у потребителя имеет место $Q_{\text{дост},i} = Q_{\text{дост},i-1}$ и $Q_{\text{выр},i} = Q_{\text{выр},i-1}$, поэтому коэффициент эффективности равен:

$$K_{\text{вх},i}^q = \frac{3_i}{Q_{\text{вх},i-1} \left(1 - \frac{q_i^{\text{ист}}}{q_{i-1}^{\text{ист}}}\right)} = \frac{3_i}{Q_{\text{выр},i-1} \left(1 - \frac{\eta_{i-1}^{\text{ист}}}{\eta_i^{\text{ист}}}\right)},$$

то есть определяется только экономией энергии в источнике.

3. Экономические критерии эффективности

Коэффициенты K_i , как показатели затрат на единицу сэкономленной энергии (топлива), могут быть трансформированы в коэффициенты чисто экономических показателей реализации энергосберегающих мероприятий, если экономию энергии (топлива) представить в денежном выражении. Для этого достаточно представить в денежном выражении через цену тепловой энергии $Ц_q$ [руб/руб.] или цену условного топлива $Ц_{\text{ут}}$ [руб/т.у.т.]:

$$K_i^q = \frac{3_i}{\Delta Q_{\text{дост},i} Ц_{\text{дост},q}}; \frac{3_i}{\Delta Q_{\text{выр},i} Ц_{\text{выр},q}}; \frac{3_i}{\Delta Q_{\text{вх},i} Ц_{\text{вх},q}};$$

в условном топливе:

$$K_i^q = \frac{3_i 7000}{\Delta Q_{\text{дост},i} Ц_{\text{ут}}}; \frac{3_i 7000}{\Delta Q_{\text{выр},i} Ц_{\text{ут}}}; \frac{3_i 7000}{\Delta Q_{\text{вх},i} Ц_{\text{ут}}}.$$

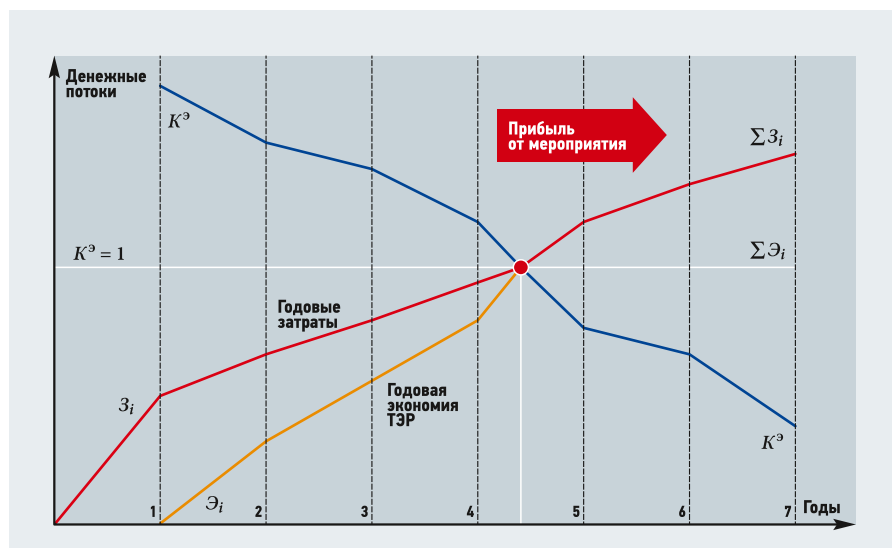


Рис. 1. Схема реализации условного мероприятия по энергосбережению

Данные зависимости представляют собой, по существу, расчёт экономической эффективности мероприятий в текущем году. Так, если затраты меньше стоимости сэкономленных энергоресурсов ($K_i^q < 1$), очевидно, что мероприятия экономически эффективны.

Поскольку цены на энергоносители растут более динамично, нежели затраты на реконструкцию (стоимость оборудования, монтаж, наладка), эффективность мероприятий по экономии ТЭР имеет тенденцию расти, во всяком случае в кратко- и среднесрочной перспективе.

Если мероприятия по экономии ТЭР осуществляются за некоторый период, то соответствующие критерии в общем виде можно представить как:

$$K^q = \frac{\sum_{i=1}^m 3_i}{\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i},$$

где $\Sigma \mathcal{E}_i$ — суммарная экономия энергии (топлива) в денежном выражении; $\mathcal{E}_i$ — величина годовой экономии энергии (топлива), руб/год.

На рис. 1 показана условная ситуация по реализации энергосберегающего мероприятия за некоторый период.

Очевидно, что в точке пересечения $\Sigma \mathcal{E}_i$ и $\Sigma 3_i$ критерий $K^q = 1$, то есть стоимость сэкономленных энергоресурсов покроет затраты на реализацию энергосберегающего мероприятия. Ордината точки пересечения соответствует сроку окупаемости мероприятия. Если он, например, меньше нормативного 0,15 (6,7 лет), то мероприятие, безусловно, экономически выгодно. Такая ситуация характерна, например, при замене котельной установки с низким коэффициентом полезного действия на новую, с более высоким КПД, когда затраты по крайней мере равны стоимости источника, монтажа и наладки объекта.

Таким образом, экономические критерии не противостоят действующей системе оценки эффективности капиталовложений. Выявление взаимосвязей между этими критериями может помочь не только определить текущие проблемы, но и найти возможные пути улучшения. Системный подход к анализу этих данных позволяет более эффективно управлять системами теплоснабжения и повышать их общую эффективность.

Выявление взаимосвязей между этими критериями может помочь не только определить текущие проблемы, но и найти возможные пути улучшения. Системный подход к анализу этих данных позволяет более эффективно управлять системами теплоснабжения и повышать их общую эффективность. ●

- Третьякова П.А. Критерии оценки эффективности системы теплоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка, 2023. №2. С. 64–68.
- Башмаков И.А. Повышение энергоэффективности в системах теплоснабжения. Часть I: Проблемы российских систем теплоснабжения // Энергосбережение, 2010. №2. С. 46–54.
- Рахимова Ю.И., Краснова Н.П., Горшенин А.С. Основные мероприятия по энергосбережению в системах теплоснабжения // Журнал СОК, 2024. №3. С. 48–50.
- Скорыходов А.И. К вопросу об эффективности и экологичности работы тепловых сетей // Новости теплоснабжения, 2004. №2. С. 38–40.
- Левшаков С.В., Семёнов С.Н. Повышение эффективности работы систем теплоснабжения на объектах ПАО «Газпром» // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2019. №2. С. 65–68.
- Середкин А.А. Методика и критерии оценки энергоэффективности систем теплоснабжения // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2017. Т. 23. №1. С. 27–35.
- Крицкий А.Б., Дементьев Ю.Н. Критерии энергоэффективности в теплоснабжающих комплексах мегаполисов // Фундаментальные исследования, 2014. №9–12. С. 2639–2643.
- Хиль И.В., Хиль Э.А. Критерии оценки систем теплоснабжения // Молодая мысль: наука, технологии, инновации: Мат. XIV Всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных (Братск, 04–08.04.2022). — Братск: БрГУ, 2022. С. 207–212.

References — see page 80.

On the criteria of efficiency of heat supply systems during their reconstruction. Pp. 29–31.

Natalia P. Krasnova, senior lecturer; **Yulia I. Rakhimova**, PhD, Associate Professor; **Andrey S. Gorshenin**, PhD, Associate Professor, Department of Industrial Thermal Power Engineering, Samara State Technical University (SamSTU)

1. P.A. Tretyakova. *Kriterii otsenki jeffektivnosti sistemy teplosnabzheniya* [Criteria for assessing the efficiency of a heat supply system]. *Jenergoberezhenie i vodopodgotovka* ["Energy Saving and Water Treatment" Magazine]. 2023. No. 2. Pp. 64–68. [In Russian]
2. I.A. Bashmakov. *Povyshenie jenergojeffektivnosti v sistemakh teplosnabzheniya. Chast' I: Problemy rossijskikh sistem teplosnabzheniya* [Improving Energy Efficiency in Heat Supply Systems. Part I: Problems of Russian Heat Supply Systems]. *Jenergoberezhenie* ["Energy Saving" Magazine]. 2010. No. 2. Pp. 46–54. [In Russian]
3. [Ju.I. Rakhimova, N.P. Krasnova, A.S. Gorshenin. Osnovnye meroprijatija po jenergoberezeniju v sistemakh teplosnabzheniya](#) [Main measures for energy saving in heat supply systems]. *Zhurnal Santechnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2024. No. 3. Pp. 48–50. [In Russian]
4. A.I. Skorokhodov. *K voprosu ob jeffektivnosti i jekologichnosti raboty teplovykh setej* [On the issue of the efficiency and environmental friendliness of heating networks]. *Novosti teplosnabzheniya* ["Heat Supply News" Magazine]. 2004. No. 2. Pp. 38–40. [In Russian]
5. S.V. Levshakov, S.N. Semenov. *Povyshenie jeffektivnosti raboty sistem teplosnabzheniya na ob'ektakh PAO "Gazprom"* [Improving the efficiency of heat supply systems at the facilities of "Gazprom", PJSC]. *Oborudovanie i tekhnologii dlja neftegazovogo kompleksa* ["Equipment and technologies for the oil and gas complex" Magazine]. 2019. No. 2. Pp. 65–68. [In Russian]
6. A.A. Seredkin. *Metodika i kriterij otsenki jenergojeffektivnosti sistem teplosnabzheniya* [Methodology and criterion for assessing the energy efficiency of heat supply systems]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* [Scientific and technical statements of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. 2017. Vol. 23. No. 1. Pp. 27–35. [In Russian]
7. A.B. Kritsky, Ju.N. Dement'ev. *Kriterii jenergojeffektivnosti v teplosnabzhajushchikh kompleksakh megapolisov* [Energy efficiency criteria in heat supply complexes of megacities]. *Fundamentalnye issledovaniya* ["Fundamental research" Magazine]. 2014. No. 9–12. Pp. 2639–2643. [In Russian]
8. I.V. Khil, Ye.A. Khil. *Kriterii otsenki sistem teplosnabzheniya* [Criteria for assessing heat supply systems]. *Molodaja mysl': nauka, tekhnologii, innovatsii: Mat. XIV (XX) Vseross. nauch.-tekhn. konf. studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchjonykh* [Young thought: science, technology, innovation. Proc. of the XIV (XX) All-Russian scientific and technical conference of students, master's students, postgraduates and young scientists]. April 4–8, 2022. Bratsk. BrGU [Bratsk State University]. 2022. Pp. 207–212. [In Russian]