

К выбору последовательности мероприятий по энергосбережению в теплоснабжении

Введение

После публикации в 2009 году Федерального закона №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» [1] в России коренным образом изменилось отношение к энергосбережению. Появилась обоюдная заинтересованность в повышении энергетической эффективности, как со стороны потребителя, так и со стороны производителя [2, 3].

На сегодняшний день техническое состояние систем теплоснабжения характеризуется следующими особенностями: физическим износом основного и вспомогательного оборудования котельных; низким КПД, в том числе котлов; неудовлетворительным водным режимом, что приводит к выходу из строя котлов и тепловых сетей, снижению КПД производства и транспорта тепла; неудовлетворительным состоянием тепловой изоляции тепловых сетей; наружной коррозией, что приводит к значительным потерям; неэффективным использованием теплоты у потребителей, что вызывает необходимость выработки и поставки повышенных объёмов теплоты, и др. [4, 5].

В результате современного низкого технического уровня систем теплоснабжения и систем учёта именно конечный потребитель оплачивает потери теплоты в котельных установках и на теплотрассах. Энергосберегающие мероприятия при производстве и транспортировке тепловой энергии подразделяются на высокозатратные, среднезатратные и малозатратные. К высокозатратным мероприятиям относятся:

- замена котлов на современные автоматизированные котлы;
- замена паровых котлов на водогрейные, где это возможно по условиям;
- замена запорной арматуры на теплотрассах.



К среднезатратным энергосберегающим мероприятиям относятся:

- оптимизация водоподготовки в котельных;
- замена горелочных устройств в котельных установках;
- оптимизация тяги за счёт дымососов, увеличения высоты дымовой трубы в котельных и т.д.;
- замена изношенных участков тепловых сетей;
- установка регулирующих приводов в системах тепло- и водоснабжения;
- очистка теплопроводов;
- использование современной изоляции теплопроводов.

К малозатратным энергосберегающим мероприятиям относятся:

- снижение расхода тепловой энергии на собственные нужды в котлах;
- оптимизация и автоматизация процессов горения в котлах;
- снижение температуры уходящих из котлов газов;
- снижение потерь теплоты в окружающую среду котельными установками;
- диагностика состояния тепловых сетей;
- проведение режимно-наладочных работ тепловых сетей;
- устранение утечек теплоносителя в тепловых сетях и арматуре.

Рецензия эксперта на статью получена 20.02.2024 [The expert review of the article was received on February 20, 2024]

УДК 658.264.07. Научная специальность: 2.1.3 (05.23.03).

К выбору последовательности мероприятий по энергосбережению в теплоснабжении

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)

Техническое состояние систем теплоснабжения в настоящий момент характеризуется большим физическим износом, неудовлетворительным состоянием тепловой изоляции, наружной коррозией и другими явлениями, ведущими к большим тепловым потерям. В статье рассмотрен ряд мероприятий по энергосбережению в системе теплоснабжения и теплораспределения. Приведено сопоставление расходов энергии в системе «источник — тепловая сеть — потребитель теплоты». Предложен обоснованный выбор последовательности реализации мероприятий по энергосбережению.

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

UDC 621.644.07. The number of scientific specialty: 2.1.3 (05.23.03).

On the choice of a sequence of energy saving measures in the heat supply

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 technical condition of heat supply systems is currently characterized by high physical wear, unsatisfactory condition of thermal insulation, external corrosion and other phenomena leading to large thermal losses. The article discusses a number of energy-saving measures in the heat supply and heat distribution system. The comparison of energy consumption in the system "Source — Heat Network — Heat Consumer" is given. A reasonable choice of the sequence of implementation of energy saving measures is proposed.

Key words: energy saving, thermal network, efficiency, efficiency criteria, choice of measures, energy losses.

В настоящее время критерием экономической эффективности различных энергосберегающих мероприятий является в первую очередь срок их окупаемости. Рыночные отношения выдвигают на первый план внедрение мероприятий, срок окупаемости которых не превышает шести месяцев, что абсурдно, так как радикальное улучшение работы систем теплоснабжения требует в том числе замены устаревшего оборудования (котельных установок, участков теплотрассы), автоматизации и учётов потоков энергоносителей [6, 7]. Реально эта величина должна составлять четыре-восемь лет [8, 9].

Параметры современных систем теплоснабжения

Современные системы теплоснабжения характеризуются общностью технологического процесса — от получения пара или горячей воды в котельной за счёт органического топлива до подачи потребителю теплоты. Оценивать работу этой системы можно в тепловых или стоимостных показателях, считая главными факторами, определяющими величину доставленной потребителю теплоты: расход топлива в котельной установке, затраты на транспортировку теплоты, ремонт оборудования, амортизация и пр. При этом в затратах на производство теплоты существенную, если не основную роль играют потери теплоты при её производстве и транспортировке [6–9]. Потенциал возможного снижения издержек в производстве теплоты, в том числе за счёт энергосбережения, огромен. Его реализация позволила бы удовлетворить растущую потребность в тепле без роста потребления первичного топлива при одновременном повышении надёжности систем теплоснабжения за счёт их реконструкции [9, 10].

Анализ ситуации показывает, что:

- практика приведения экономии условного топлива, при реализации энергосберегающего мероприятия, к величине прибыли не даёт ответа на вопрос, на чём скажется эффект мероприятия — на чистой экономии топлива или на увеличении объёма отпускаемой энергии;
- при единовременном внедрении нескольких мероприятий трудно оценить их влияние друг на друга;
- в качестве критерия отбора мероприятий для очередности их внедрения принимается срок их окупаемости, который определяется ценовыми показателями.

Таким образом, задачи выработки критериев определения эффективности мероприятий требуют дифференцированного учёта как технического, так и экономического аспектов.

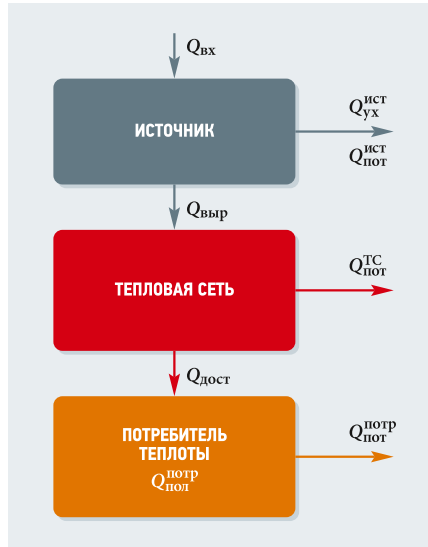


Рис. 1. Параметры системы «источник — тепловая сеть — потребитель теплоты»

Высокая стоимость внедрения энергосберегающих мероприятий во многом определяется тем фактором, что в неё зачастую включаются затраты, напрямую не связанные с энергосбережением, но которые необходимы для обеспечения функционирования предприятий и обеспечения жизнедеятельности персонала.

В качестве примера рассмотрим систему «источник — тепловая сеть — потребитель теплоты» (далее — система А).

На рис. 1 приведена схема расчёта параметров системы А. Здесь: $Q_{вх}$ — внесённое количество энергии на котельную установку источника в виде натурального топлива, Дж/ч; $Q_{выр}$ — выработанное количество энергии на котельной установке источника, Дж/ч; $Q_{дост}$ — количество энергии, доставленное потребителю теплоты, Дж/ч; $Q_{пол}^{потр}$ — полезно использованная теплота у потребителя, Дж/ч; $Q_{ух}^{ист}$ — потери теплоты с уходящими газами на котле источника, Дж/ч; $Q_{пот}^{ист}$ — потери теплоты на котле источника, в том числе в окружающую среду, Дж/ч; $Q_{пот}^{ТС}$ — потери теплоты в тепловой сети, включая утечки теплоносителя, Дж/ч; $Q_{пот}^{потр}$ — потери теплоты потребителем, включая фильтрацию, Дж/ч.

Общий тепловой баланс системы:

$$Q_{вх} = BQ_H^P = Q_{пол}^{потр} + Q_{ух}^{ист} + Q_{пот}^{ист} + Q_{пот}^{ТС} + Q_{пот}^{потр}, \quad (1)$$

где B — расход топлива на котельную установку источника теплоты, (кг у.т.)/ч; Q_H^P — теплота сгорания условного топлива, Дж/кг.

В настоящее время критерием экономической эффективности различных энергосберегающих мероприятий является в первую очередь срок их окупаемости

Удельный расход теплоты в «идеальной» системе (при отсутствии потерь) равен:

$$q_0 = \frac{BQ_H^P}{Q_{пол}^{потр}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Дж}}.$$

Удельный расход теплоты в реальной системе 1 будет равен:

$$q = \frac{BQ_H^P}{Q_{пол}^{потр}} = \frac{1}{1 - \frac{Q_{ух}^{ист} + Q_{пот}^{ист} + Q_{пот}^{ТС} + Q_{пот}^{потр}}{BQ_H^P}} = 1 + \frac{Q_{ух}^{ист} + Q_{пот}^{ист} + Q_{пот}^{ТС} + Q_{пот}^{потр}}{Q_{пол}^{потр}}, \frac{\text{Дж}}{\text{Дж}}.$$

Общий КПД системы «источник — тепловая сеть — потребитель» может быть определён следующим образом:

$$\begin{aligned} Q_{выр} &= BQ_H^P \eta^{ист}; Q_{дост} = Q_{выр} \eta^{ТС}; \\ Q_{пол}^{потр} &= Q_{дост} \eta^{потр}; \\ Q_{пол}^{потр} &= BQ_H^P \eta, \end{aligned}$$

откуда:

$$\begin{aligned} Q_{выр} &= BQ_H^P \eta^{ист} = Q_{дост} \eta^{ТС} = \\ &= Q_{выр} \eta^{ТС} \eta^{потр} = BQ_H^P \eta^{ист} \eta^{ТС} \eta^{потр}, \end{aligned}$$

или $\eta = \eta^{ист} \eta^{ТС} \eta^{потр}$.

Так, если, например:

- КПД котла на источнике $\eta^{ист} = 0,85$;
 - КПД тепловой сети $\eta^{ТС} = 0,82$;
 - КПД потребителя $\eta^{потр} = 0,70$,
- то общий КПД системы будет равен $\eta = 0,85 \times 0,82 \times 0,70 = 0,488$ (48,8 %).

Сопоставление расходов энергии

Следует особо подчеркнуть, что по мере передачи и преобразования энергии [от вошедшей (в виде топлива) до доставленной потребителю (в виде тепловой энергии)] её ценность возрастает, так как на единицу полезной энергии по мере её передачи требуется всё больше суммарной энергии, связанной с её передачей и потерями в процессе передачи, как в виде потерь энергоносителя (утечки), так и в виде потерь теплоты в процессе передачи. То есть в рассматриваемой нами системе «источник — тепловая сеть — потребитель теплоты» имеет место:

$$q^{ист} < q^{ист-ТС} < q^{ист-ТС-потр}, \text{ а именно:}$$

$$\begin{aligned} 1 + \frac{Q_{ух}^{ист} + Q_{пот}^{ист}}{Q_{выр}} &< 1 + \frac{Q_{ух}^{ист} + Q_{пот}^{ист} + Q_{пот}^{ТС}}{Q_{дост}} < \\ < 1 + \frac{Q_{ух}^{ист} + Q_{пот}^{ист} + Q_{пот}^{ТС} + Q_{пот}^{потр}}{Q_{пол}^{потр}}, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \frac{1}{1 - \frac{Q_{ух}^{ист} + Q_{пот}^{ист}}{BQ_H^P}} &< \frac{1}{1 - \frac{Q_{ух}^{ист} + Q_{пот}^{ист} + Q_{пот}^{ТС}}{BQ_H^P}} < \\ < \frac{1}{1 - \frac{Q_{ух}^{ист} + Q_{пот}^{ист} + Q_{пот}^{ТС} + Q_{пот}^{потр}}{BQ_H^P}}. \end{aligned}$$

Последнее неравенство наглядно иллюстрирует это универсальное положение. В преобразованном виде данное неравенство выглядит следующим образом:

$$\frac{1}{1 - \frac{Q_{ух}^{ист} + Q_{пот}^{ист}}{BQ_H^P}} < \frac{1}{1 - \frac{Q_{ух}^{ист} + Q_{пот}^{ист} + Q_{пот}^{ТС}}{BQ_H^P}} < \frac{1}{1 - \frac{Q_{ух}^{ист} + Q_{пот}^{ист} + Q_{пот}^{ТС} + Q_{пот}^{потр}}{BQ_H^P}}.$$

Каждый последующий знаменатель дроби меньше на величину соответствующих потерь, а соответствующая дробь больше предыдущей.

В рассмотренном примере выше:

- $\eta^{ист} = 0,85$, тогда $q^{ист} = \eta_0 / \eta^{ист} = 1/0,85 = 1,176$ Дж/Дж;
- $\eta^{ТС} = 0,85$, тогда $q^{ТС} = \eta_0 / \eta^{ТС} = 1/0,82 = 1,220$ Дж/Дж;
- $\eta^{потр} = 0,70$, тогда $q^{потр} = \eta_0 / \eta^{потр} = 1/0,70 = 0,429$ Дж/Дж;
- $\eta^{ист} = 0,85$, тогда $q^{ист-ТС} = \eta_0 / \eta^{ист-ТС} = 1/0,697 = 1,435$ Дж/Дж;
- $\eta^{ист-ТС-потр} = 0,85 \times 0,82 \times 0,8 = 0,488$, тогда $q^{ист-ТС-потр} = \eta_0 / \eta^{ист-ТС-потр} = 1/0,488 = 2,050$ Дж/Дж.

Очевидно, что

$$q^{ист} < q^{ист-ТС} < q^{ист-ТС-потр} = 1,176 < 1,435 < 2,050.$$

Выбор последовательности реализации мер по энергосбережению

Очевидно, что полезная энергия (теплота) у потребителя дороже, чем у поставщика (теплотрасса), которая, в свою очередь, дороже энергии (теплоты) у производителя. Так, в нашем примере теплота, потреблённая потребителем при прочих равных условиях, в 1,743 раза дороже выработанной на источнике и в 1,429 раза дороже доставленной теплоты:

$$\frac{q^{ист-ТС-потр}}{q^{ист}} = \frac{2,050}{1,176} = 1,743;$$

$$\frac{q^{ист-ТС-потр}}{q^{ист-ТС}} = \frac{2,050}{1,435} = 1,429.$$

На рис. 2 в качестве иллюстрации приведён пример анализа рассмотренной системы А.

Как показано на рис. 2, разница между q и q_0 представляет собой фактические потери (диссипацию) энергии в системе «источник — тепловая сеть — потребитель теплоты»:

$$\Delta q = q - q_0 = 2,05 - 1,0 = 1,05 \text{ Дж/Дж},$$

ведущие к росту стоимости передаваемой энергии.

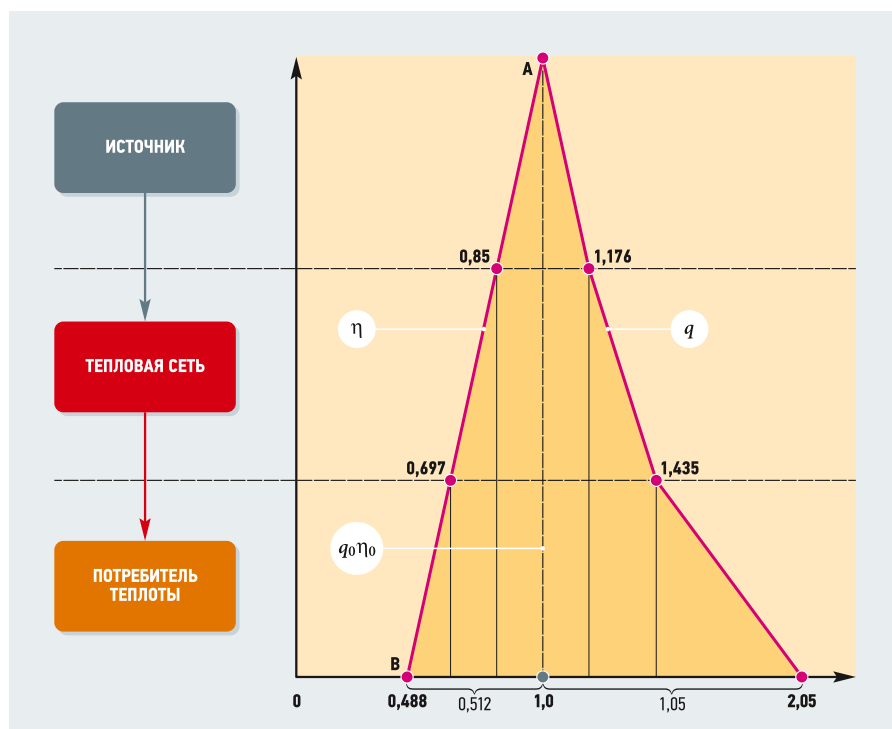


Рис. 2. Анализ системы «источник — тепловая сеть — потребитель теплоты»

Разница между трендами η и η_0 также представляет собой фактические потери при трансформации (транспортировке) энергии в системе 1. Точка А на рис. 2 соответствует поступившей в систему энергии в виде топлива, условно соответствующей «1», точка В соответствует энергии, полезно используемой потребителями, а их соотношение является КПД системы:

$$\eta = Q_{пол}^{потр} / (BQ_H^P) = 0,488/1,0 = 0,488.$$

Энергосбережение следует осуществлять в первую очередь у потребителя, где эффект на вложенный рубль будет максимальным, далее на тепловой сети и в последнюю очередь — на источнике

Очевидно, что для получения единицы полезной энергии необходимо ввести в систему количество энергии, равное:

$$q = (BQ_H^P) / Q_{пол}^{потр} = 1,0/0,488 = 2,05 \text{ Дж/Дж}.$$

Потери энергии составят, как указано выше, величину $\Delta q = 1,05$ Дж/Дж.

Более крутая характеристика на рис. 2 у потребителя иллюстрирует, что энергосбережение следует осуществлять в первую очередь у потребителя, где эффект на вложенный рубль будет максимальным, далее на тепловой сети и в последнюю очередь — на источнике (котельных или ТЭЦ). Такое универсальное положение распространяется на все системы транспорта и преобразования энергии, например, систему «добыча газа — транспортировка — распределение — потребление». ●

- Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 23.11.2009 №261-ФЗ.
- Методические рекомендации по организации экономического стимулирования внедрения энергосберегающих мероприятий в системах теплоснабжения на объектах ОАО «Газпром». — М.: ОАО «Газпром»; ОАО «Промгаз», 2004.
- Башмаков И.А., Панушкин В.Н. Разработка программ развития, модернизации и реабилитации систем теплоснабжения // Новости теплоснабжения, 2004. №7.
- Скороходов А.И. К вопросу об эффективности и экологичности работы тепловых сетей // Новости теплоснабжения, 2004. №2.
- 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 критерий оценки энергоэффективности систем теплоснабжения // Вестник СПбГПУ, 2017. Т. 23. №1. С. 27–35.
- Крицкий А.Б., Деметьев 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. молодых учёных (г. Братск, 04–08.04.2022). — Братск: БрГУ, 2022. С. 207–212.
- Бровкин Ю.Л. О сроках окупаемости проектов по полной замене теплосетей и котельных // Новости теплоснабжения, 2004. №12.
- Султанов О.П. Методика расчёта срока окупаемости проектов по полной замене теплосетей и котельных // Новости теплоснабжения, 2004. №9.

References — see page 78.

On the choice of a sequence of energy saving measures in the heat supply.
Pp. 55–57.

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

1. *Ob jenergosberezhenii i o povyshenii jenergeticheskoy jeffektivnosti i o vnesenii izmenenij v otdeľnye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federatsii* [On energy saving and on increasing energy efficiency and on introducing amendments to certain legislative acts of the Russian Federation]. *Federal'nyj zakon ot 23.11.2009 №261-FZ (s izm. i dop.)* [Federal Law No. 261-FL of November 23, 2009 (as amended and supplemented)]. [In Russian]
2. *Metodicheskie rekomendatsii po organizatsii jekonomicheskogo stimulirovaniya vnedreniya jenergosberegajushhih meroprijatij v sistemakh teplosnabzheniya na ob'ektakh OAO "Gazprom"* [Methodological recommendations for organizing economic incentives for the implementation of energy-saving measures in heat supply systems at the facilities of "Gazprom", OJSC]. *Vedomstvennyj rukovodjashhij dokument* [Departmental guidance document]. Moscow. OAO "Gazprom" ["Gazprom", OJSC]; OAO "Promgaz" ["Promgaz", OJSC]. 2004. [In Russian]
3. I.A. Bashmakov, V.N. Panushkin. *Razrabotka programm razvitiya, modernizatsii i reabilitatsii sistem teplosnabzheniya* [Development of programs for the development, modernization and rehabilitation of heat supply systems]. *Novosti teplosnabzheniya* ["Heat Supply News" Magazine]. 2004. No. 7. [In Russian]
4. A.I. Skorokhodov. *K voprosu ob jeffektivnosti i jekologichnosti raboty teplovykh setej* [On the issue of efficiency and environmental friendliness of heating networks]. *Novosti teplosnabzheniya* ["Heat Supply News" Magazine]. 2004. No. 2. [In Russian]
5. S.V. Levshakov, S.N. Semenov. *Povyshenie jeffektivnosti raboty sistem teplosnabzheniya na ob'ektakh PAO "Gazprom"* [Increasing 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 Bulletins of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)]. 2017. Vol. 23. No. 1. Pp. 27–35. [In Russian]
7. A.B. Kritsky, Ju.N. Dement'ev. *Kriterii jenergojeffektivnosti v teplosnabzhajushhih kompleksakh megapolisov* [Energy efficiency criteria in heat supply complexes of megacities]. *Fundamental'nye issledovaniya* ["Basic Scientific Research" Magazine]. 2014. No. 9–12. Pp. 2639–2643. [In Russian]
8. I.V. Khil, Je.A. Khil. *Kriterii otsenki sistem teplosnabzheniya* [Criteria for evaluating heat supply systems]. *Molodaja mysl': nauka, tekhnologii, innovatsii: Mat. XIV Vseros. nauch.-tekhn. konf. studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Young Mind: Science, Technology, Innovation: Proc. of the XIV All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Masters, Postgraduate Students and Young Scientists] (Bratsk, April 4–8, 2022). Bratsk. BrGU [Bratsk State University]. 2022. Pp. 207–212. [In Russian]
9. Ju.L. Brovkin. *O srokakh okupaemosti proektov po polnoj zamene teplosetej i kotel'nykh* [On the payback period of projects for the complete replacement of heating networks and boiler houses]. *Novosti teplosnabzheniya* ["Heat Supply News" Magazine]. 2004. No. 12. [In Russian]
10. O.P. Sultanov. *Metodika rascheta sroka okupaemosti proektov po polnoj zamene teplosetej i kotel'nykh* [Methodology for calculating the payback period of projects for the complete replacement of heating networks and boiler house]. *Novosti teplosnabzheniya* ["Heat Supply News" Magazine]. 2004. No. 9. [In Russian]