

УДК 620.92:621.1

М.С. Басс, А.Г. Батухтин, С.А. Требунских

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

M.S. Bass, A.G. Batuhitin, S.A. Trebunskikh

METHODOLOGICAL ISSUES FOR EVALUATING EFFECTIVENESS DISTRICT HEATING SYSTEMS

Оценка методов повышения эффективности систем централизованного теплоснабжения возможна только на основе комплексного анализа, учитывающего взаимосвязь между физическими закономерностями производства и преобразования тепловой энергии и особенностями экономической эффективности инвестиций.

ЭНТРОПИЯ. ПРОИЗВОДСТВО ЭНТРОПИИ. ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ. ОТОПЛЕНИЕ. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ.

The estimation of the methods of increasing to efficiency of the systems of the centralized supply possible only on base of the complex analysis, taking into account intercoupling between physical regularity production and transformations to heat energy and particularity to cost-performance investment.

ENTROPY. ENTROPY PRODUCTION. THERMAL ENERGY. HEATING. THERMODYNAMIC CYCLE.

Основная задача оценки энергетических процессов любых технических систем — это определение эффективности использования затраченной в них энергии. Наиболее часто в качестве критерия оценки эффективности используется отношение полезной энергии к затраченной, определяемое по балансам энергетических потоков и учитывающее потери в окружающую среду. Данный показатель рассчитывается только на основе закона сохранения энергии (чаще всего — его частного случая в форме первого закона термодинамики) и, как правило, носит название коэффициента полезного действия. В строгом смысле слова применять КПД имеет смысл только при преобразовании теплоты в работу. Но его используют и применительно к тепловым преобразованиям, например в теплообменных аппаратах, хотя в таких случаях корректнее говорить о коэффициенте преобразования энергии (КПЭ). Для исследования обратных циклов холодильных и теплонасосных установок используется коэффициент холодильной эффективности. Существенный недостаток балансового метода связан с невозможностью учесть ограничения, налагаемые вторым законом

термодинамики. Этот недостаток хорошо известен, однако понятия КПД и КПЭ широко используются в науке и технике, так как эти критерии просты в применении, наглядны и, что немаловажно, локальны, т. е. позволяют рассчитать эффективность в какой-либо точке независимо от предыдущих и последующих процессов.

Все реальные процессы протекают неравновесно, поэтому для их адекватной оценки необходимо ориентироваться на закономерности термодинамики неравновесных процессов. Среди методов, позволяющих учесть неравновесность реальных процессов, наиболее часто используется эксергетический анализ. Существуют и методы, учитывающие изменение энтропии без явного выделения эксергии. Эти методы, как правило, нелокальны, не дают возможности определить эффективность процесса в любой точке, они позволяют вычислять только интегральный, итоговый результат по начальным и конечным параметрам. Кроме того, они рассматривают температуру окружающей среды как постоянную, хотя в реальности она может изменяться и во времени, и в пространстве в окрестности рассматриваемого объекта.

В формализме неравновесной термодинамики широко применяется концепция локального равновесия, что дает предпосылку для разработки локального критерия эффективности с учетом потерь на необратимость. Введенный в [1] критерий энтропийной эффективности

$$\eta = \frac{dN}{dS_{\max}} = 1 - \frac{dS}{dS_{\max}}, \quad (1)$$

будучи локальным, дает возможность для определения эффективности теплофизического процесса в широком диапазоне граничных условий, в том числе и при нелинейном изменении параметров окружающей среды, в первую очередь — температуры. Критерий основан на представлении о текущем производстве энтропии (dS), максимально возможном в данных условиях производстве энтропии (dS_{\max}) и производстве негэнтропии ($dN = dS_{\max} - dS$). Производство негэнтропии характеризует локальное поддержание параметров системы, отличных от параметров окружающей среды. Итоговый критерий энтропийной эффективности вычисляется суммированием производств негэнтропии и максимальной энтропии и отношением этих сумм:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{\sum dN}{\sum dS_{\max}}. \quad (2)$$

Применение данной концепции позволило получить критерии эффективности для различных теплопотребляющих объектов.

Для турбоустановок энтропийная эффективность равна

$$\frac{dN}{dS_{\max}} = \frac{\eta_T}{\eta_{TK}}, \quad (3)$$

где η_T и η_{TK} — соответственно КПД реального цикла и термический КПД цикла Карно. Формула показывает, насколько близко реальный процесс приближается к идеальному прямому циклу Карно в том же диапазоне температур.

Холодильная установка или тепловой насос характеризуются сходным критерием:

$$\frac{dN}{dS_{\max}} = \frac{\xi_T}{\xi_{TK}}, \quad (4)$$

где ξ_T и ξ_{TK} — холодильные коэффициенты соответственно реального обратного цикла и обратного цикла Карно. Подобно критерию, полученному для турбины, эта величина показывает, насколько близко реальный холодиль-

ный процесс приближается к идеальному обратному циклу Карно в том же диапазоне температур.

Применение коэффициента энтропийной эффективности термодинамически обосновывает отношение реального критерия эффективности к идеальному, которое позволяет сравнивать эффективность циклов установок, работающих в различных температурных диапазонах. Кроме того, появляется возможность оценить единым коэффициентом прямые и обратные циклы, что невозможно сделать в рамках концепции коэффициента полезного действия.

Объекты, преобразующие только тепловую энергию, также можно рассматривать с применением коэффициента энтропийной эффективности. Так, изучение особенностей производства энтропии в простом отапливаемом помещении, охлаждаемом наружным воздухом, позволило вывести коэффициент его энтропийной эффективности, численно равный

$$\frac{dN}{dS_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{R_{Q6}}{R_{Qct}}}, \quad (5)$$

где R_{Q6} и R_{Qct} — полные термические сопротивления теплопередаче соответственно для батарей отопления и внешних ограждающих конструкций.

Применение концепции балансового КПД, как и КПЭ, для отапливаемых помещений не имеет смысла, поскольку вся подводимая теплота необратимо рассеивается в окружающую среду без совершения работы и без нагрева выводимого из системы теплоносителя. Предлагаемый энтропийный коэффициент позволяет не только численно выразить эффективность теплоснабжения через теплофизические свойства системы отопления и ограждающих конструкций, но и сравнить показатели эффективности разных построек с их собственными параметрами.

Простое отапливаемое помещение — частный случай теплообменника. Энтропийная эффективность теплообменной установки с изменением температур или фазовых состояний теплоносителей характеризуется общей формулой, одинаковой для прямоточной и противоточной схем движения теплоносителей и любых значений температуры окружающей среды.

Значения энтропийной эффективности коррелируют со значениями, рассчитываемыми на основании классического эксергетического и предельного методов, повышаясь по мере увеличения площади теплообмена. Расчет по альтернативному методу эксергетического анализа дает противоположные результаты с уменьшением эффективности по мере роста площади теплообмена (см. рис.). Балансовый КПЭ в условиях хорошей термоизоляции, приближающейся к адиабатной, практически стремится к 100 %, слабо снижаясь с ростом внешней площади теплообмена.

Предлагаемый локальный подход позволяет освободиться от необходимости учитывать неравновесность при постоянной температуре окружающей среды. Для каждой точки можно учитывать местное значение внешней температуры, в общем случае нелинейно меняющейся в разных участках системы (например, температуры воздуха, воды и грунта в одно и то же время существенно различаются), с единственным условием соблюдения принципа локального равновесия.

Результаты, полученные при использовании различных термодинамических подходов, существенно противоречат друг другу, и на сегодняшний день нет общепринятого метода оценки термодинамической эффективности процесса. Кроме того, оценка мероприятий, направленных на модернизацию объектов энергетики, имеет

ряд экономических особенностей, выходящих за границы применимости существующих методов термодинамического анализа. Поэтому наряду с термодинамической оценкой требуется разработать актуальные методы оценки технико-экономической эффективности объекта или мероприятия.

Проекты, направленные на повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения за счет внедрения энергоэффективных технологий и режимных мероприятий, могут способствовать достижению значительного экономического эффекта. При этом данные мероприятия могут потребовать значительных капитальных затрат и привести к изменению годовых эксплуатационных затрат, что определяет необходимость технико-экономической оценки данных мероприятий.

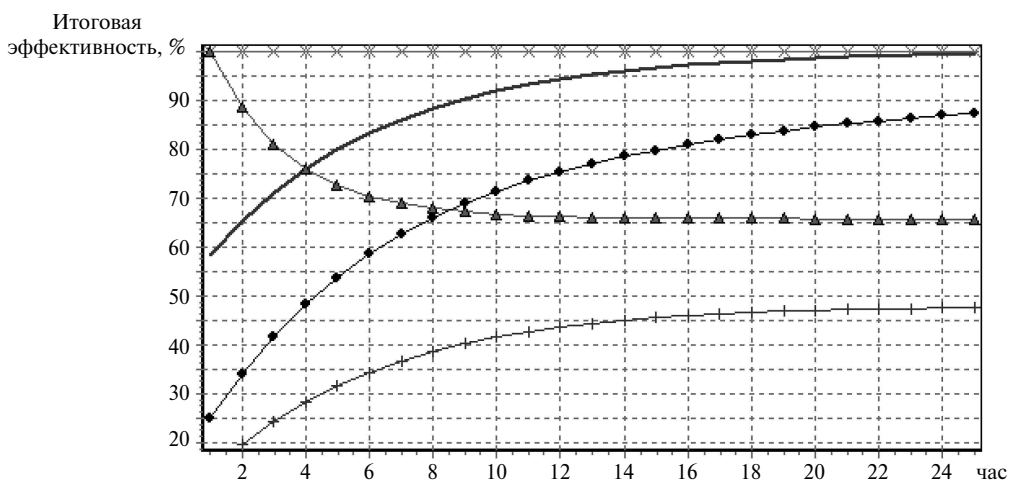
Согласно существующей нормативной базе для сравнения эффективности инвестиционных проектов рекомендуется использовать ряд основных показателей:

чистый дисконтированный доход (ЧДД), или интегральный эффект (Net Present Value — NPV); индекс доходности — ИД (Profitability Index — PI);

внутреннюю норму доходности — ВНД (Internal Rate of Return — IRR);

срок окупаемости (Payback Period — PBP).

Все представленные выше экономические критерии в совокупности с условиями, которым



Сравнение различных значений интегральной эффективности проточного теплообменника при увеличении площади поверхности теплообмена

(—×— — $KПЭ_{ТБ}$; —△— — $KПЭ_{ТП}$; —+— — $KПД_{экс кл}$;
—▲— — $KПД_{экс некл}$; —●— — dN/dS_{max})

они должны удовлетворять, образуют систему для объективной количественной оценки экономической целесообразности инвестиционных проектов. При этом ни один из перечисленных критериев сам по себе не является достаточным для принятия проекта. Объективным критерием экономической целесообразности служит лишь одновременное выполнение всех условий. В отличие от экономической целесообразности, условие оптимальности какого-либо решения или проекта — достижение максимальной величины чистого дисконтированного дохода.

При рассмотрении экономической целесообразности мероприятий, направленных на повышение эффективности, необходимо придерживаться принципа одновременного выполнения всех рассмотренных выше условий. Исключение — малозатратные мероприятия. Поскольку увеличение располагаемой мощности систем централизованного теплоснабжения относится к инвестиционным проектам, единственная цель которых — поддержание функционирования системы, то условием оптимальности этих мероприятий будет минимизация затрат. В качестве критерия в данном случае необходимо рассматривать годовые дисконтированные затраты в системе за время реализации проекта:

$$Z = \sum_{t=0}^{T_{\text{пр}}} K_t \frac{1}{(1+E)^t} + \sum_{t=0}^{T_{\text{пр}}} I_t^* \frac{1}{(1+E)^t}, \quad (6)$$

где I_t^* — текущие издержки на t -м шаге, необходимые для функционирования системы при увеличенной мощности, руб.; K_t — капитальные вложения на t -м шаге, необходимые для увеличения располагаемой мощности руб.; E — приемлемая норма дохода на капитал, год⁻¹; $T_{\text{пр}}$ — срок службы рассматриваемого объекта инвестирования, лет; t — номер шага расчета от $t = 0$ до $T_{\text{пр}}$.

Для сопоставления различных мест и способов оценки увеличения мощности системы может быть использовано изменение годовых дисконтированных затрат в системе:

$$\Delta Z = \sum_{t=0}^{T_{\text{пр}}} K_t \frac{1}{(1+E)^t} + \sum_{t=0}^{T_{\text{пр}}} (I_t^* - I_{t,c}) \frac{1}{(1+E)^t}, \quad (7)$$

где $I_{t,c}$ — текущие издержки на t -м шаге, необходимые для функционирования системы без увеличения мощности, руб.

При определении годовых издержек необходимо учитывать расчетные характеристики теплоснабжения как конкретных потребителей, так и всей системы централизованного теплоснабжения, которые характеризуют затраты топлива [2, 3].

Зависимость теплоты от времени [4] для любого объекта можно описать следующей формулой:

$$\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} = \left[\cos \left(\frac{\tau - \tau_{\text{max}}}{T} 2\pi \right) + 1 \right]^a \frac{Q_{\text{max}}}{2bQ_{\text{год}}} + q_{\text{ГВС}}, \quad (8)$$

где τ_{max} — момент времени, к которому достигается наибольшая нагрузка котельной Q_{max} ; T — продолжительность года; $q_{\text{ГВС}}$ — доля выработанной теплоты, идущей на горячее водоснабжение; a и b — эмпирические коэффициенты.

Доля нагрузки на ГВС $q_{\text{ГВС}}$ принята постоянной в течение года и равной минимальной нагрузке, соответствующей июню. Ее исключают из общего теплового баланса, вычитая из ежемесячной нагрузки минимальную. В случае, когда неизвестны величины отпуска тепла с котельной по месяцам, но известны доли потребления, $q_{\text{ГВС}}$ исключают из общего теплового баланса следующим образом:

$$\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} \right)_{\text{без ГВС}}^i = \frac{\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} \right)^i - \left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} \right)_{\text{min}}}{100 - 12 \left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} \right)_{\text{min}}} 100. \quad (9)$$

Определение тепловой нагрузки за месяц:

$$Q_{\text{мес}} = \frac{Q_{\text{мес max}}}{\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} \right)_{\text{max}}} \left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} \right), \quad (10)$$

где $\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} \right)_{\text{max}}$ — максимальное значение относительной тепловой годовой характеристики; $\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} \right)$ — значение относительной тепловой годовой характеристики для данного периода; $Q_{\text{мес max}}$ — максимальная тепловая нагрузка объекта.

При наличии нагрузки ГВС требуется добавить эту величину к ежемесячной нагрузке.

Потребление за год определяется по формуле

$$Q_{\text{год}} = \frac{Q_{\text{мес max}}}{\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} \right)_{\text{max}}} \quad (11)$$

Зная стоимость 1 Гкал или 1 кВт, можно определить потребление энергии как в топливном, так и в денежном эквиваленте.

Основной принцип оценки эффективности инвестиционных проектов — это заимствованный из зарубежной практики принцип учета многообразия интересов, согласно которому,

мероприятие может быть признано экономически эффективным только при условии его экономической целесообразности для всех участников и отсутствии негативного эффекта на субъектов, не участвующих в нем. Реализация данного принципа при оценке методов повышения эффективности систем централизованного теплоснабжения возможна только на основе комплексного анализа, который учитывает взаимосвязь между физическими закономерностями производства и преобразования тепловой энергии и особенностями экономической эффективности инвестиций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Требунских, С.А.** Энтропийная эффективность теплотребляющих объектов [Текст] / С.А. Требунских, А.Г. Батухтин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. № 2(123). — 2011. № 2. — С. 91–99.

2. **Басс, М.С.** Упрощенная методика расчета нормативов удельных расходов топлива в отопительных котельных применительно к условиям Забайкальского края [Текст] / М.С. Басс, А.Г. Батухтин, С.А. Требунских // Промышленная энергетика. — 2009. № 9. — С. 37–41.

3. **Басс, М.С.** Методика оптимизации состава оборудования в комбинированных системах теплоснабжения / М.С. Басс, А.Г. Батухтин, С.Г. Батухтин // Промышленная энергетика. — 2012. № 10. — С. 49–52.

4. **Басс, М.С.** Годовые характеристики систем теплоснабжения [Текст] / М.С. Басс, С.Г. Батухтин, К.А. Кубряков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2012. № 3-2(154). — С. 39–45.

БАСС Максим Станиславович — кандидат технических наук, доцент директор трансфера технологий Технопарка Забайкальского государственного университета.

672039, ул. Александрово-заводская, 30 г. Чита, Забайкальский государственный университет, Россия
(3022) 41-70-85
bms77@mail.ru

БАТУХТИН Андрей Геннадьевич — кандидат технических наук, доцент, директор Технопарка Забайкальского государственного университета.

672039, ул. Александрово-заводская, 30 г. Чита, Забайкальский государственный университет, Россия
(3022) 41-70-85

ТРЕБУНСКИХ Сергей Анатольевич — кандидат технических наук, доцент кафедры ТЭС Технопарка Забайкальского государственного университета.

672039, ул. Александрово-заводская, 30, Забайкальский государственный университет, Россия
(3022) 41-70-85