

УДК 620.9:697.3

## Исследование термодинамической эффективности системы теплоснабжения

Н.В. Старикова<sup>1</sup>, В.С. Степанов<sup>1</sup>

Иркутский государственный технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия. E-mail: stepanov@istu.edu  
Статья поступила 27.01.2012, принята 30.05.2012

*В статье представлена методика термодинамического анализа системы теплоснабжения как единого комплекса, состоящего из трех элементов: генерирующий источник (теплоэлектроцентраль), тепловые сети, потребители тепла (системы отопления и горячего водоснабжения). Описаны методы оценки эффективности каждой из подсистем и системы теплоснабжения в целом. Термодинамическая эффективность ТЭЦ определена на основе полного энергетического баланса с использованием эксергетического метода анализа и понятий химической энергии и эксергии топлива. Применен эксергетический критерий разнесения суммарного расхода топлива между производимыми на ТЭЦ видами энергии. Это позволяет по отдельности анализировать производство этих продуктов на ТЭЦ и определять его энергетический и эксергетический КПД. Полученные результаты подтверждают полезность и даже необходимость использования такого подхода и методов для оценки термодинамической эффективности теплоэлектроцентрали. Показано, что определение энергетического потенциала топлива на основе значений химической энергии и эксергии дает возможность правильно оценить величину подведенной энергии, а также рассчитать энергетические и эксергетические КПД основных агрегатов ТЭЦ. Для потребителей тепла разработаны принципы формирования идеализированных аналогов и методика определения минимально необходимых затрат энергии на цели отопления и горячего водоснабжения, что позволяет оценить их термодинамическую эффективность на основе энергетического и эксергетического КПД.*

**Ключевые слова:** термодинамическая эффективность, системы теплоснабжения, теплоэлектроцентраль, отопление и горячее водоснабжение.

## Thermodynamic efficiency analysis of heat supply system

N. V. Starikova<sup>1</sup>, V. S. Stepanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Technical University, 83 Lermontova str., Irkutsk, Russia. E-mail: stepanov@istu.edu  
The article received 27.01.2012, accepted 30.05.2012

*The article proposes the thermodynamic analysis procedure for a heat supply system as an integrated complex consisting of three elements: a generating source (a heat and power plant), heating systems and heat consumers (heating and hot-water supply systems). The methods of efficiency estimate for every subsystem and a water supply system on the whole have been described. The thermodynamic efficiency of a heating plant has been determined on the basis of a complete energy balance using an exergic analysis technique and the concepts of chemical energy and fuel energy. The exergic criterion of total fuel separation as to the kinds of energy produced at the heating plant has been applied. It enables to individually analyze these products generation and determine their energy and exergic efficiency factors. The obtained results corroborate the utility and even necessity of employing such an approach and methods of assessing thermodynamic efficiency of the heating plant. It has been shown that determining of fuel energy potential based on the values of chemical energy and exergy enables to correctly evaluate the amount of the supplied energy and calculate energy and exergic efficiency factors of the heating plant main units. The principles of the idealized analogs formation and the technique for determining the baseline minimum of energy expenditure for heating and hot-water supply that makes it possible to assess their thermodynamic efficiency based on chemical energy and exergy efficiency factors have been developed for consumers.*

**Key words:** thermodynamic efficiency, heat supply systems, heating plant, heating and hot-water supply.

Под системой теплоснабжения (СТС) в общем случае понимается комплекс следующих взаимосвязанных объектов: источник тепла (ИТ) – тепловые сети (ТС) – потребитель (ПТ) (рис. 1). Каждый из них имеет свое назначение, из которого вытекает цель функционирования объекта.

Источник тепла призван производить тепловую энергию на заданных видах теплоносителя с заданными параметрами, используя различные природные и техногенные энергоресурсы. Задачей тепловых сетей является транспортирование полученной в ИТ тепло-

вой энергии к потребителям с необходимыми для него параметрами (температурой, давлением и т. п.).

Но именно потребители тепла, их тип (коммунально-бытовые или производственные в различных отраслях экономики) определяют требования к параметрам и режимам производства и передачи по трубопроводам теплоносителей и, следовательно, в большой степени влияют на эффективность функционирования первых двух объектов системы.

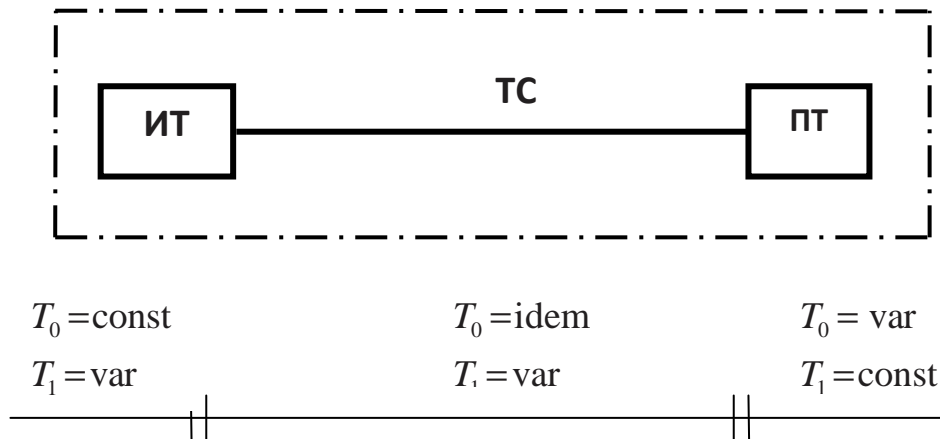


Рис. 1. Принципиальная схема системы теплоснабжения (источник – тепловые сети – потребитель)

Однако на практике при исследовании систем теплоснабжения, как правило, из сферы рассмотрения исключают потребителей тепловой энергии. Обычно независимо от других элементов системы теплоснабжения исследуются только источники тепла с целью выбора оптимальных схем и параметров установленного на них оборудования, либо тепловые сети с той же целью. Иногда эти два объекта рассматриваются совместно

Полезность такого рода исследований не вызывает сомнений, поскольку их результаты позволяют получить важную информацию для совершенствования теплогенерирующих установок источника и оборудования тепловых сетей. В частности, иногда в таких исследованиях ставится задача определить КПД функционирования каждого из этих элементов в отдельности, без учета каких-либо ограничений, накладываемых требованиями конкретных потребителей тепла. Методы оценки термодинамической эффективности этих подсистем общеизвестны, их КПД определяются по соотношениям полезной (отданной на сторону) тепловой энергии к энергии всех видов, затраченной в каждом элементе на выполнение его целевой функции. При этом принимается, что полезная энергия для ИТ – это теплота\*, отпущенная в систему теплоснабжения, для ТС – это теплота, подведенная по трубопроводам к потребителю.

Как правило, эти значения находят по выражениям

$$\eta_{ИТ} = \frac{Q_{отп}}{B \cdot Q_n^p} \quad \text{и}$$

$$\eta_{ТС} = \frac{Q_{отп} - \Delta Q_{ТС}}{Q_{отп}} = \frac{Q_{подв}}{Q_{отп}},$$

где  $Q_{отп}$  – отпущенная в систему теплота;  $\Delta Q_{ТС}$  – потери тепла в тепловых сетях;  $Q_{подв}$  – подведенная к потребителю теплота;  $B$  – расход топлива за рассматриваемый период времени;  $Q_n^p$  – низшая теплота его сгорания.

Найденные таким образом КПД рассматриваемых элементов системы никак не зависят от потребителя, его параметров. Поэтому установленные для них максимальные значения КПД и условия их достижения не будут соответствовать условиям, при которых достигается максимальная термодинамическая эффективность всей системы теплоснабжения как единого комплекса, включающего потребителя тепла.

При такой постановке задачи повышение КПД в одной из подсистем без учета требований других подсистем не может привести к повышению эффективности системы теплоснабжения в целом.

Понимание этого обстоятельства находит свое отражение в публикациях, появляющихся в научнотехнической литературе в последнее время [1]. В них делается попытка рассмотрения системы теплоснабжения как единого комплекса, включающего потребителя тепла. Однако до настоящего времени, насколько нам известно, никому сделать это не удалось, поскольку не решена задача определения термодинамической эффективности разного рода потребителей тепла.

Нами поставлена задача разработать методику для оценки термодинамической эффективности, пригодную для анализа всех элементов системы теплоснабжения как в сфере генерирования, так и в сфере потребления (на примере основных процессов коммунально-бытовой сферы – отопления и горячего водоснабжения).

Рассматривается система теплоснабжения, состоящая из ТЭЦ, тепловых сетей и потребителей, в качестве которых выбраны потребители тепла на цели отопления и горячего водоснабжения комплекса многоэтажных жилых зданий.

Современные методы оценки термодинамической эффективности топливосжигающих установок на основе энергетического и эксергетического КПД, опреде-

\* Строго говоря, при определении этих показателей нужно использовать значения энтальпии теплоносителя.

ляемых с использованием химической энергии и эксергии топлив, подробно рассмотрены в [5].

Определения КПД систем транспорта тепловой энергии общеизвестны.

Самой большой проблемой является оценка эффективности энергии у потребителя, поэтому он, как правило, исключается из рассмотрения при исследовании системы теплоснабжения. Методы исследования, пригодные для других стадий, через которые проходит энергия с момента ее поступления из природной среды (добыча, преобразование, передача, распределение, трансформация параметров), непригодны для анализа процессов потребления.

Представляется, что оценка эффективности процессов должна быть основана на сравнении их характеристик с теоретическими (предельными) термодинамическими показателями, которые могут быть установлены на базе некоторого идеального/идеализированного аналога процесса. В этом случае показатели сравнения являются стабильными и не зависящими от конкретных условий.

В инженерной практике уже давно и достаточно широко пользуются понятием идеального/идеализированного аналога для оценки энергетического совершенства процессов и машин, чтобы получить ясное представление о том, насколько они могут быть улучшены и каков предел снижения расхода энергии, затрачиваемой на процесс. При этом в зависимости от характера решаемых задач используется аналог с разной степенью идеализации, как, например, в теплоэнергетике помимо цикла Карно, определяемого только температурами горячего и холодного источников теплоты (предельная идеализация – идеальный аналог), применяют циклы, которые учитывают вид и физические свойства используемого рабочего тела (идеализированный аналог).

Для идеализированного аналога могут быть рассчитаны энергетический  $\eta_{\text{ЭН}}^{\text{идл}}$  и эксергетический  $\eta_{\text{ЭКС}}^{\text{идл}}$  КПД по выражениям, подобным тем, по которым определяются эти характеристики для реальных процессов.

Сопоставление реальных процессов с идеализированными аналогами по КПД означает, по существу, оценку степени совершенства исследуемого процесса через относительные КПД, которыми широко пользуются в энергетике:

$$\eta_{\text{ЭН}}^{\text{отн}} = \eta_{\text{ЭН}}^{\text{реал}} / \eta_{\text{ЭН}}^{\text{идл}} ; \quad (1)$$

$$\eta_{\text{ЭКС}}^{\text{отн}} = \eta_{\text{ЭКС}}^{\text{реал}} / \eta_{\text{ЭКС}}^{\text{идл}} . \quad (2)$$

Поскольку полезный эффект реального процесса и его идеализированного аналога должен быть одним и тем же, то  $\sum I_{\text{пол}}^{\text{реал}} = \sum I_{\text{пол}}^{\text{идл}}$  и  $\sum E_{\text{пол}}^{\text{реал}} = \sum E_{\text{пол}}^{\text{идл}}$  тогда с учетом (1) и (2) можно записать

$$\eta_{\text{ЭН}}^{\text{отн}} = \sum I_{\text{затр}}^{\text{идл}} / \sum I_{\text{затр}}^{\text{реал}} ; \quad (3)$$

$$\eta_{\text{ЭКС}}^{\text{отн}} = \sum E_{\text{затр}}^{\text{идл}} / \sum E_{\text{затр}}^{\text{реал}} . \quad (4)$$

Для огромного многообразия энергопотребляющих процессов, производящих металлы, изделия из них, промышленные материалы, химические вещества, продукты, услуги, создающих комфорт и т. д., понятие полезная энергия теряет свой истинный смысл. Это означает, что для них не может быть рассчитан КПД по общепринятой методике.

Для выхода из этой проблемы было предложено заменить *полезную энергию* в числителе выражения КПД величиной *предельных (теоретических) затрат энергии/эксергии* на осуществление процесса или производство какого-либо продукта –  $I_{\text{мин}}^* \cdot E_{\text{мин}}^*$ . Эта величина определяется из энергетического баланса идеального аналога реального процесса с  $\eta_{\text{ЭН}}^{\text{идл}} = 1$ ;  $\eta_{\text{ЭКС}}^{\text{идл}} = 1$  (предельная степень идеализации). То есть, абсолютный энергетический и эксергетический КПД любого технологического процесса равен отношению теоретических затрат энергии к фактическим:

$$\eta_{\text{ЭН}}^{\text{реал}} = I_{\text{мин}}^* / I_{\text{затр}}^{\text{реал}} ; \quad (5)$$

$$\eta_{\text{ЭКС}}^{\text{реал}} = E_{\text{мин}}^* / E_{\text{затр}}^{\text{реал}} . \quad (6)$$

Из этого следует, что абсолютный энергетический КПД реального процесса может быть определен только в том случае, когда энергетические затраты идеального аналога не равны нулю, т. е. при  $I_{\text{мин}}^* \neq 0$ .

Идеальный аналог любого технологического процесса является высшей степенью идеализации и соответствует, если проводить аналогию, циклу Карно в энергетике. Однако такая предельная степень идеализации не позволяет глубоко анализировать реальные процессы. Поэтому необходимо разрабатывать *идеализированные аналоги* реальных производств (подобные циклам Отто, Дизеля, Ренкина и др. в энергетике), более приближенные к реальным условиям.

На основе энергетического баланса идеализированного аналога могут быть определены *минимально необходимые затраты энергии/работы* для каждого исследуемого процесса –  $I_{\text{мин}}^* \cdot E_{\text{мин}}^*$  и рассчитаны относительные КПД:

$$\eta_{\text{ЭН}}^{\text{отн}} = I_{\text{мин}}^* / I_{\text{затр}}^{\text{реал}} ; \quad (7)$$

$$\eta_{\text{ЭКС}}^{\text{отн}} = E_{\text{мин}}^* / E_{\text{затр}}^{\text{реал}} . \quad (8)$$

Чем выше значение  $\eta_{\text{ЭН}}^{\text{отн}}$ , тем совершеннее в энергетическом смысле реальный процесс и тем труднее найти пути дальнейшего его совершенствования. На основе относительных КПД можно сравнивать различные технические системы и выбирать из них наилучшую по критерию минимального расхода энергии.

При формировании идеального (идеализированного) аналога на отопление жилых зданий нами принялись следующие исходные положения.

1. Целью процесса является обеспечение минимально необходимых условий для жизни и деятельности человека.

2. Эти условия определяются санитарно-гигиеническими нормами по нижней их границе.

3. Минимальные потребности в тепле не должны зависеть от технических характеристик зданий, их конструктивного и архитектурно-планировочного исполнения (материала и типа ограждающих конструкций, этажности, ориентации в пространстве и т. п.).

4. Минимальные затраты тепла на цели отопления должны учитывать климатические условия отдельных регионов и населенных пунктов.

*Вариант предельной идеализации (идеальный аналог)* этих объектов, по-видимому, должен характеризоваться бесконечно большим коэффициентом сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций ( $R_0 = \infty$ ) и полным отсутствием инфильтрации ( $L_{\text{инф}} = 0$ ). Для такого аналога здания минимально необходимая потребность в тепле для целей отопления очевидно равна нулю.

Однако предположение о полном отсутствии инфильтрации в идеальном аналоге здания неправомерно, поскольку в таком случае не учитывается целевое назначение здания, то обстоятельство, что в нем должен жить, работать и отдыхать человек. Следовательно, даже в идеальном аналоге зданий необходимо учитывать, что существуют санитарно-технические нормы по качеству воздуха в помещении и что человек не может долго находиться в нем без подачи свежего воздуха. Согласно российским нормам, при предельно допустимой концентрации  $\text{CO}_2$  (0,1 % на  $1 \text{ м}^3$  воздуха) должен быть обеспечен воздухообмен не менее  $30 \text{ м}^3/\text{ч}$  на человека.

В отопительный период свежий воздух, подаваемый в жилое или общественное помещение, очевидно, должен подогреваться. Минимальный расход тепла, необходимый для этой цели, будет определяться, с одной стороны, температурой внутри помещения, которая в общем случае также устанавливается в соответствии с санитарными нормами, регламентирующими ее в зависимости от назначения здания. Для жилых зданий эта температура обычно составляет  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , для общественных разного назначения (детские сады, больницы, кинотеатры и т. п.) она колеблется в диапазоне  $14\text{-}22 \text{ }^\circ\text{C}$ .

С другой стороны, минимально необходимый расход тепла на подогрев воздуха зависит от температуры наружного воздуха, т. е. от климатического района, в котором размещается здание. При известном годовом графике хода температур  $t_i(\tau)$  минимальные затраты тепла на отопление такого идеального жилого или административно-общественного здания составят

$$Q_{\text{от}}^{\text{min}} = (1 - \gamma_{\text{ут}}) \bar{c}_v \cdot L_{\text{св}}^* \int_{\tau_{\text{н}}}^{\tau_{\text{к}}} (t_{\text{в}}^{\text{п}} - t_{\text{н}}) d\tau, \quad (9)$$

где  $L_{\text{св}}^*$  – нормативный объем свежего воздуха,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\tau_{\text{н}}$ ,  $\tau_{\text{к}}$  – время начала и окончания отопительного периода, ч;  $\gamma_{\text{ут}}$  – коэффициент регенерации тепла, т. е. доля тепла удаляемого вентиляционного воздуха, по-

лученного в утилизационной установке;  $\bar{c}_v$  – средняя удельная теплоемкость воздуха,  $\text{Вт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ ;  $t_{\text{в}}^{\text{п}}$  – расчетная температура воздуха внутри помещения,  $^\circ\text{C}$ .

Обычно известны средние температуры наружного воздуха за некоторые промежутки времени (например, среднемесячные) (рис. 2), тогда минимальные затраты тепла можно найти по выражению:

$$Q_{\text{от}}^{\text{min}} = (1 - \gamma_{\text{ут}}) \bar{c}_v \cdot L_{\text{св}}^* \sum_{i=1}^n (t_{\text{в}}^{\text{п}} - t_{\text{н},i}) \Delta\tau_i, \quad (10)$$

где  $n$  – число временных интервалов;  $\Delta\tau_i$  – продолжительность  $i$ -го периода.

Таким образом, не составляет большого труда рассчитать, например, величину минимально необходимых затрат тепла на отопление жилых зданий на человека в год, обусловленных санитарно-гигиеническими требованиями, для любого климатического района, для которого известны соответствующие климатологические характеристики.

При исследовании системы отопления необходимо учитывать ее особенности. Функция системы отопления зданий состоит в том, чтобы компенсировать потери эксергии зданием, имеющим нормативную температуру внутреннего воздуха  $t_{\text{в}}^*$ , в локальную окружающую среду с переменной температурой  $t_{\text{н},j}$  (рис. 1).

Для этого нет необходимости подводить энергию высокого качества или потенциала, что делается в системах централизованного теплоснабжения или электроотопления. Применение подобных систем определяется другими соображениями, а не требованиями потребителя, которые должны быть основой при определении для них значений минимально необходимых затрат энергии/эксергии.

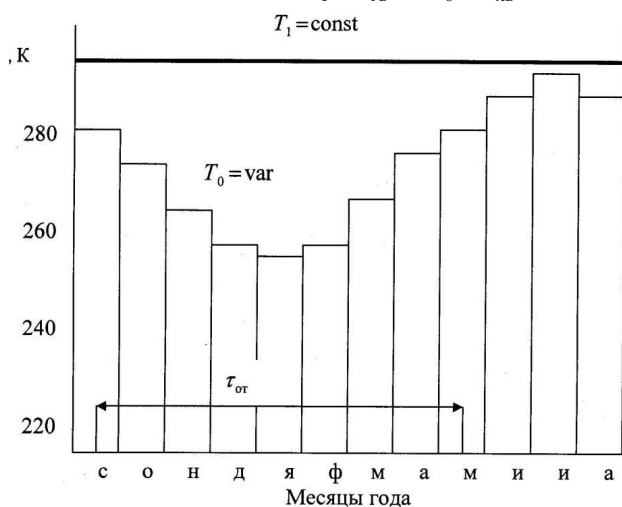
Только такой подход применим для исследования всего многообразия систем отопления зданий, в том числе на базе воздушного отопления, теплого пола, теплового насоса и всевозможных их комбинаций.

В связи с этим при расчете эксергетических потерь здания следует принимать температуру  $T_1$  равной температуре воздуха внутри помещений  $T_1 = \text{const}$ , а значения  $T_0$  принимать с учетом климатологических данных о стоянии температур наружного воздуха в рассматриваемом регионе  $T_0 = \text{var}$ .

С учетом сказанного, при определении величины минимально необходимых затрат эксергии для потребителей тепла нужно использовать эксергетическую температурную функцию вида  $\omega_e$ , при вычислении которой принимать:  $T_1$  равной расчетной температуре внутри помещений  $T_1 = t_{\text{в}}^{\text{п}}$ ;  $T_0$  равной средней за рассматриваемый период температуре наружного воздуха  $T_0 = t_{\text{н},j}$ .

Подобные характеристики нетрудно определить и для процессов горячего водоснабжения, принимая при расчете минимальных затрат эксергии значения  $T_1$  и

$T_0$ , соответственно, равными расчетным температурам горячей и холодной воды:  $T_1 = t_{ГВ}^*$  и  $T_0 = t_{ХВ}^*$ .



**Рис. 1.** График изменения среднемесячной температуры наружного воздуха и продолжительности отопительного периода для г. Иркутска.

Что касается производственных потребителей тепла, то в процессе формирования идеализированных аналогов технологических процессов необходимо участие технологов, которые должны определить значения требуемых температур для различных процессов.

Располагая значениями  $I_{\min}$  и  $E_{\min}$  для каждого потребителя тепла, можно оценить его термодинамическую эффективность по соотношениям (7) и (8), которые показывают степень приближения реального процесса к его идеализированному аналогу.

Необходимо отметить, что численные величины минимально необходимых затрат энергии/эксергии, как и значения определяемых на их основе КПД, зависят от типа сформированного идеализированного аналога исследуемого объекта, степени его идеализации. Это диктует необходимость стандартизации самого процесса формирования аналогов, алгоритмов определения

затрат энергии/эксергии на их функционирование для всего многообразия используемых в технике энергопотребляющих объектов.

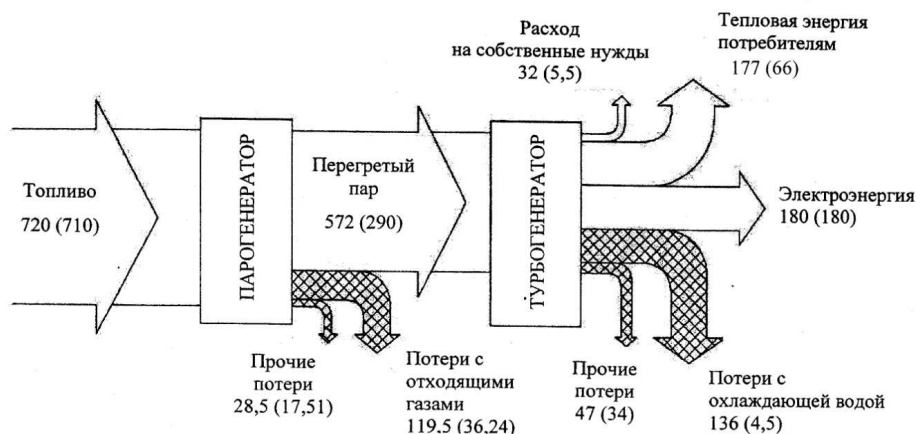
Определив эффективность потребителя тепла, можно найти относительный КПД всей системы теплоснабжения. Для этого необходимо установить границы исследуемой системы, определить потоки энергии/эксергии на входе в систему и на выходе из нее. В данном случае минимальные энергетические затраты потребителя характеризуют целевой продукт как подсистемы потребления энергии, так и всей системы теплоснабжения в целом.

На рис. 3 показаны результаты полного энергетического баланса теплоэлектроцентрали, работающей на угле.

Станция укрупненно представлена только двумя своими подразделениями – котельным и турбинным цехами, энергобалансы которых составлены по принципу «вход – выход».

Полный энергобаланс ТЭЦ рассчитан на производительность котлов 230 т пара в час с параметрами  $t_{\text{пп}} = 510$  °С,  $p_{\text{п}} = 10,8$  МПа и турбинами Т-87-90. Приход энергии (эксергии) с топливом определялся на основе удельных значений химической энергии и эксергии топлива, приведенных в [12]. Каждый энергетический поток характеризуется работоспособной частью (эксергией), которая указывается в скобках.

Теплоэлектроцентральный является комплексным объектом. Ее производственный цикл на этом типе электростанций является комбинированным, т. е. в одном агрегате и на одном потоке пара осуществляется два процесса – снабжение тепловой энергией потребителей и производство электрической энергии. С термодинамической точки зрения это очень разные процессы. Возникает проблема разнесения общего расхода топлива между теплом и электроэнергией, поскольку от этого зависит топливная составляющая издержек, которая, в свою очередь, является базой для обоснования тарифов на тепло и электроэнергию для потребителей.



**Рис. 3.** Диаграмма полного энергетического баланса ТЭЦ.

Согласно используемому в настоящее время «физическому» методу разнесения затрат между теплом и электроэнергией, на ТЭЦ все преимущества комплексного производства относятся на производство электроэнергии. Эксплуатационные расходы ТЭЦ распределяются с помощью коэффициентов, основанных на предварительном распределении расхода топлива.

Распределение топлива, израсходованного котельным цехом, между электроэнергией и теплом основывается на том, что удельный расход условного топлива на единицу тепла, отпускаемого с коллекторов ТЭЦ, определяется одинаково, независимо от того, откуда поступает пар для стационарных бойлеров и паропреобразователей – непосредственно из котлов (через редуционно-охлаждающую установку) или из отборов турбин, по формуле

$$b_q^0 = \frac{1}{7\eta_{\text{кот}}^{\text{н.т}} \eta_{\text{т.о}}} \text{ т у.т./Гкал,} \quad (11)$$

где  $\eta_{\text{кот}}^{\text{н.т}}$  – КПД котельного цеха (нетто тепловой);  $\eta_{\text{т.о}}$  – КПД теплофикационного отделения ТЭЦ.

Нами предлагается распределять расход топлива в соответствии с соотношением эксергии получаемых на электростанции видов продукции, т. е. в соответствии с суммарной эксергией произведенных электроэнергии и тепла. Метод разнесения не только топливной составляющей, но и суммарных эксплуатационных затрат по эксергетическому критерию предложен достаточно давно [28, 43, 55] и уже апробирован на примере ряда комплексных процессов цветной металлургии (со значительно большим количеством производимых видов продукции), при анализе процесса производства кокса (между коксом и коксовым газом) и т. д.

В соответствии с данными полного энергетического баланса, приведенного на рис. 3, топливо, израсходованное в котельном цехе (35,7 т или 24,56 т у.т.) должно быть распределено в соответствии с соотношениями:

$$24,56 \cdot \frac{180}{246} = 17,97 \text{ т у.т. на электроэнергию;}$$

$$24,56 \cdot \frac{66}{246} = 6,59 \text{ т у.т. на тепловую энергию.}$$

Удельный расход топлива на выработку электроэнергии при этом составит 0,359 кг у.т./кВт·ч, на выработку тепловой энергии – 37,23 кг у.т./ГДж.

Полученные показатели, безусловно, непривычны для энергетиков, но под эксергетическим критерием лежит фундаментальная термодинамическая основа.

Вопросам исследования эффективности тепловых сетей, оптимизации их схем и параметров посвящено огромное количество работ. Хотя нельзя не отметить, что среди них практически нет работ, в которых эти вопросы рассматриваются с использованием эксергетического анализа. Приложение эксергии для исследования этих объектов с методической точки зрения малоинтересны, в то же время для целостности картины поведения и взаимодействия элементов системы теплоснабжения такого исследования не хватает. Тем не менее, этот объект в данной статье подробно не рассмат-

ривается. Потери тепла в магистральных и распределительных трубопроводах в дальнейшем принимаем равными ~10 % от величины потребляемой тепловой энергии. Данные, полученные при рассмотрении отдельных компонентов (подсистем) системы теплоснабжения, позволяют оценить термодинамическую эффективность конкретной системы в целом. Такая система была нами исследована. В качестве примера была рассмотрена система теплоснабжения комплекса многоэтажных жилых зданий в г. Иркутске, снабжаемых теплом от ТЭЦ. Число жителей в микрорайоне составляет 4000 человек, душевое потребление тепла в год принято, по данным администрации, 32,82 ГДж. Часовая нагрузка рассматриваемого комплекса зданий составляет 161,2 (64,0) ГДж, потери в тепловой сети 15,8 (2,0) ГДж.

В соответствии с принятым эксергетическим методом разнесения затрат топлива на производимую продукцию получено, что на тепловую энергию в количестве 177 ГДж/час затрачивается 6,59 т у.т. (193,17 ГДж). Диаграмма потоков энергии (эксергии) в системе теплоснабжения жилого района представлена на рис. 4. Эти данные позволяют рассчитать энергетические и эксергетические КПД как отдельных элементов, так и всей системы теплоснабжения рассматриваемого микрорайона.

В результате получены следующие значения энергетических и эксергетических КПД:

для теплофикационной части ТЭЦ

$$\eta_{\text{эн}}^{\text{тч}} = \frac{177}{193,17} = 0,916; \quad \eta_{\text{экс}}^{\text{тч}} = \frac{66}{190,49} = 0,346;$$

для тепловых сетей

$$\eta_{\text{эн}}^{\text{тс}} = \frac{161,7}{177} = 0,91; \quad \eta_{\text{экс}}^{\text{тс}} = \frac{64}{66} = 0,969;$$

для потребителей тепла

$$\eta_{\text{эн}}^{\text{п}} = \frac{31,54}{161,2} = 0,196; \quad \eta_{\text{экс}}^{\text{п}} = \frac{7,34}{64} = 0,115;$$

КПД системы теплоснабжения в целом

$$\eta_{\text{эн}}^{\text{стс}} = \frac{31,54}{193,17} = 0,163; \quad \eta_{\text{экс}}^{\text{стс}} = \frac{7,34}{190,49} = 0,0385.$$

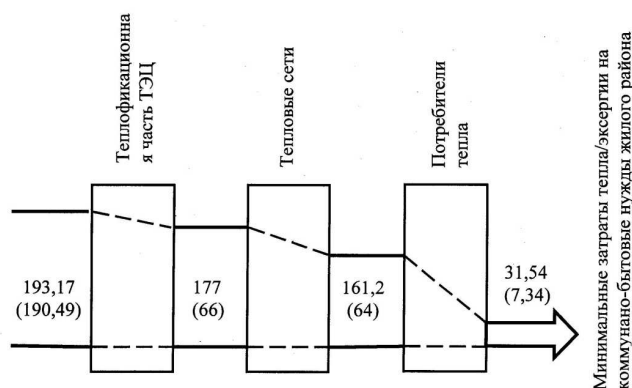


Рис. 4. Диаграмма потоков энергии (эксергии) в системе теплоснабжения жилого района.

Как видно из расчетов, полученные значения КПД для системы теплоснабжения оказались очень низкими, что, впрочем, неудивительно, поскольку минимальные

затраты потребителя нами определены на основе идеальных аналогов. Как уже ранее было отмечено, минимальные затраты тепла на цели отопления и горячего водоснабжения могут быть определены на основе других аналогов, с иными допущениями и параметрами их функционирования. Именно они требуют согласования и стандартизации.

Однако полученные значения этих КПД очень важны, поскольку показывают степень приближения энергоэффективности СТС к пределу. Это примерно то же самое, что КПД цикла Карно дает для оценки реальных тепловых установок.

### Литература

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Энергоиздат, 1982. 360 с.
2. Андрущенко А.И., Николаев Ю.Е., Семенов Б.А. Принципы создания высокоэкономичных систем централизованного теплоснабжения городов // Промышленная энергетика. 2003. №5. С.8-12.
3. Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Постановка задачи и методические подходы для термодинамического исследования системы теплоснабжения // Энергосистемы, электростанции и их агрегаты: сб. тр. НГТУ: Новосибирск, 2005. Вып.9. С. 159-166.

4. Степанов В. С., Степанова Т.Б. Эффективность использования энергии. Новосибирск: Наука, 1994. 257 с.

5. Степанов В.С., Старикова Н.В. Оценка термодинамической эффективности систем отопления и горячего водоснабжения // Изв. вузов. Строительство. 1994. №11. С. 110-114.

6. Калинин Е. И., Бродянский В.М. Термоэкономический метод разделения затрат в многоцелевой технической системе // Изв. вузов. Энергетика. 1974. № 3. С. 58–63.

### References

1. Sokolov E.Ya. Installation of heating systems. – М.: Energoizdat, 1982. – 360 p.

2. Andrushchenko A.I., Nikolaev U.E., Semyonov B.A. Principles of designing highly economical systems for central supply of cities// Promyshlennaya energetika, 2003, № 5. – P. 8-12.

3. Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. Problem statement and methodological approaches to heat supply systems thermodynamic research // Energosistemy, elektrostantsii i ikh agregaty // Sbornik trudov NGTU: Novosibirsk, 2005. – Vyp. 9. – P. 159-166.

4. Stepanov V.S., Stepanova T.B. Energy utilization efficiency. Novosibirsk: Nauka, 1994. 257 p.

5. Stepanov V.S., Starikova N.V. Heating systems and hot-water supply thermodynamic efficiency assessment// Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. – 1994. № 11. - P. 110-114.

6. Kalinina E.I., Brodyanski V.M. Thermodynamic method of costs separation in a multipurpose technical system] // Izvestiya vuzov. Energetika. 1974. № 3. P. 58–63.

УДК 658.386.3.633.33

## Моделирование нагрузок роторного экскаватора при взаимодействии с забоем

А.В. Минеев<sup>1</sup>, Е.Е. Милосердов<sup>1</sup>, И.А. Макляк<sup>1</sup>

Сибирский федеральный университет, пр. Свободный 79, Красноярск, Россия. E-mail: Djops1983@mail.ru.  
Статья поступила 18.12.2011, принята 16.05.2012

*Одним из резервов, позволяющих повысить надёжность дорогостоящей техники в процессе её эксплуатации, является моделирование основных механизмов оборудования роторных экскаваторов и существующих приводных систем с учётом определения основных динамических нагрузок и внедрения датчиков, расположенных в строго определенных местах на роторном экскаваторе большой единичной мощности. С помощью четкого моделирования и использования необходимых датчиков мы можем получить достаточно реальную картину взаимодействия основных функциональных узлов и механизмов роторного экскаватора и определить факторы, негативно влияющие на её нормальную работу. Кроме того, полученная информация позволит проектировщикам и изготовителям новых видов данного оборудования иметь ту необходимую информацию о функциональном состоянии оборудования, которую они ранее не имели возможности получить. Показано моделирование нагрузок роторного экскаватора большой единичной мощности при взаимодействии с забоем в процессе эксплуатации. С помощью комплексного моделирования основных узлов роторного экскаватора в процессе экскавации и при его перемещении, возможно, произвести оценку технического состояния и свести к минимуму аварийные ситуации в условиях эксплуатации столь сложной техники. Рассмотрены и определены основные зависимости сил, воздействующих на роторный экскаватор при его эксплуатации в забое, а также рассмотрены зависимости, возникающие при взаимодействии опор лыж роторного экскаватора с грунтом с учетом возникающих отклонений по крену и тангажу. Определяются основные зависимости при эксплуатации роторного экскаватора большой единичной мощности, на основании которых происходит оценка основных нагрузок на экскаватор роторный ЭРШРД 5250.*

**Ключевые слова:** роторный экскаватор, опоры лыж, крен, тангаж, моделирование.

## Load modeling for a rotary excavator in a pitface

A.V. Mineev<sup>1</sup>, E.E. Miloserdov<sup>1</sup>, I.A. Maclyak<sup>1</sup>

Siberian Federal University, 79 Svobodny av., Krasnoyarsk, Russia. E-mail: Djops1983@mail.ru.  
The article received 18.12.2011, accepted 16.05.2012