

1. Путем анализа показано, что утилизация теплоты, теряемой от горячих поверхностей печи, может быть выполнена без существенного нарушения теплового режима ее работы в целом.

2. Рассмотрены, проанализированы и сделаны оценки двух вариантов утилизации теплоты, теряемой с горячих поверхностей печи в окружающую среду. Обращено внимание на то обстоятельство, что в процессе утилизации теплоты необходимо соблюдать определенные условия ее отвода во избежание нарушения теплового режима работы печи, предусмотренного технологией производства продукции.

3. Первый вариант модернизации предусматривает полную замену теплоизоляционных материалов печи, устанавливаемых по обе стороны ее металлического корпуса, т. е. изнутри и снаружи.

4. Второй вариант модернизации предусматривает установку коаксиальных теплообменников со стороны наружной стенки печи, не изменяя состояние ее теплоизоляции изнутри.

5. Разработан комплекс программных средства (ЦЗВ4, ВрП5, ВрП6, ВрП7 и др.), позволяющих путем многочисленных расчетов определять различные показатели, сопутствующие реализации того или иного варианта модернизации печи. Их рекомендуется использовать при разработке как новых печей, так и соответствующих устройств, направленных на утилизацию теплоты действующих печей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И с а ч е н к о, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М., 1969.
2. М и х е е в, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М., 1973.
3. Л и п с и ц, И. В. Инвестиционный проект: методы подготовки и анализа: учеб.-справ. пособие / И. В. Липсиц, В. В. Косов. – М.: Изд-во БЕК, 1996.
4. Б а й р а ш е в с к и й, Б. А. Теплопровод «труба в трубе» как альтернативный вариант двухтрубной прокладки / Б. А. Байрашевский, Н. П. Борушко // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2006. – № 1.

Представлена кафедрой ПТЭ и ТТ БНТУ

Поступила 14.05.2010

УДК 621

### К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ОРГАНИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО\*

Асп. БЕГЛЯК А. В., канд. техн. наук РЫЖОВА Т. В.

*Белорусский национальный технический университет,  
ОАО «Минский автомобильный завод»*

В настоящее время основным параметром сравнения эффективности теплотехнологий служит удельный расход условного топлива ( $b_{7000}$ ) на

единицу производства целевого продукта (например, электрической энергии). Этот параметр является сугубо техническим, отражающим топливные затраты на производство продукции и в подавляющем большинстве сопос-

\* Печатается в порядке обсуждения.

тавлений не может полностью отразить картину потребления первичных энергоресурсов в денежном выражении.

В связи с этим многие технико-экономические сопоставления, обещающие значительную экономическую эффективность в тоннах условного топлива (т у. т.), в реальности могут оказаться совершенно невыгодными в денежном выражении, или наоборот.

Понятие «условное топливо» (у. т.) принято для сравнения калорийных характеристик различных топлив. Однако при этом ни в коем случае нельзя однозначно сказать, что в денежном выражении 1 м<sup>3</sup> природного газа и 1 м<sup>3</sup> нефтяного кокса (отход нефтепереработки) при одинаковой теплоте сгорания (около 8000 ккал/м<sup>3</sup>) эквивалентны между собой по эффективности вариантов теплотехнологий.

Как известно, в качестве единицы условного топлива в различных странах используется [1]:

- теплота сгорания 1 кг каменного угля, равная 29,308 МДж/кг (7000 ккал/кг). Такая характеристика применялась в бывшем СССР (она используется и сегодня в странах постсоветского пространства);
- теплота сгорания 1 кг нефти, равная 41,868 МДж/кг (10000 ккал/кг). 41,868 ГДж называется нефтяным эквивалентом и применяется Международным энергетическим агентством (IEA).

Основные виды топлива в Республике Беларусь и их переводные коэффициенты (в условное топливо) приведены в табл. 1 [2, 3].

Таблица 1

Теплотворная способность основных видов топлива

Топливо	Низшая теплотворная способность $Q_n^p$ , МДж/м <sup>3</sup> (кг)	Переводной коэффициент в условное топливо
Природный газ	33,5	1,14
Фрезерный торф (влажный, $w = 50\%$ )	10,5	0,36
Древесина (береза, сосна)	8,7	0,30
Бурый уголь	15,0	0,51
Каменный уголь	29,3	1,00
Мазут	39,2	1,34
Дизельное топливо	42,7	1,46
Нефть	41,9	1,43

Эффективность сравниваемых теплотехнологий, к примеру стационарных, зависит не только от количества и теплоты сгорания топлива, но и от его стоимости (добычи, доставки, сортировки, затрат труда). Отсюда видно, что сравнивая варианты по  $b_{7000}$ , один из них при значительном оценочном экономическом эффекте, выражающемся в значительной экономии органическо-

го топлива, может иметь низкую эффективность в денежном выражении, так как стоимость топлива не будет адекватна его ценовой характеристике.

Наиболее простой пример представляет собой выбор (оценочное сравнение эффективности) теплового двигателя, важной характеристикой которого служит термический КПД

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (1)$$

где  $T_1, T_2$  – соответственно начальная и конечная температуры рабочего тела (верхнего и нижнего источников энергии), К.

Однако сравнивать варианты по величине  $\eta_t$  нельзя, так как при реализации теплотехнологии  $\eta_t$  (идеального обратимого цикла Карно) существенно снижается до величины  $\eta$  [4]

$$\eta = \eta_i \eta_{oi} \eta_p \eta_g, \quad (2)$$

где  $\eta_{oi}$  – относительный внутренний КПД теплового двигателя;  $\eta_p$  – КПД редуктора (при его наличии);  $\eta_g$  – КПД генератора (производство электрической энергии).

Из (2) видно, что существуют дополнительные показатели, влияющие на величину энергетического КПД. Однако при анализе различных систем в сопоставимых условиях (аналогичной мощности) КПД редуктора и генератора (при их наличии), а также относительный внутренний КПД имеют сопоставимые величины для различных типов двигателей, а это значит, что определяющее значение для оценки энергетического КПД будет иметь именно термический КПД цикла, который зависит только от начальной и конечной температур рабочего тела.

Как отмечалось выше, для сравнения энергетической эффективности различных вариантов теплотехнологий очень удобно использование удельного расхода условного топлива ( $b_{7000}$ ). Тогда для конденсационной стационарной теплотехнологии (электрической станции, КЭС) будет иметь вид [5]

$$b_{3,3} = \frac{B}{\mathcal{E}} = \frac{3600}{Q_{\text{н}}^p \eta} = \frac{3600}{29300 \eta} = \frac{0,123}{\eta}, \quad (3)$$

где  $b_{3,3}$  – удельный расход условного топлива для производства электрической энергии, кг у. т./(кВт·ч) (табл. 2);  $B$  – расход условного топлива за отчетный период, кг у. т.;  $\mathcal{E}$  – количество произведенной электрической энергии, кВт·ч.

Из (3) удельный расход условного топлива для конденсационной электростанции определяется электрическим КПД теплового двигателя. В табл. 2 приведены показатели основных типов тепловых двигателей.

Таблица 2

Значения  $\eta$  и  $b_{3,3}$  основных типов тепловых двигателей\*

Тип двигателя	$\eta, \%$	$b_{3,3}, \text{ кг у. т./кВт}\cdot\text{ч}$
Паровая турбина	20–45	0,273–0,615
Газовая турбина	28–43	0,286–0,439
Поршневой двигатель	38–47	0,262–0,324

Топливная ячейка	50	0,246
Парогазовая установка	38–60	0,205–0,324

\* Данные, приведенные в числовом диапазоне, отражают зависимость эффективности от начальных и конечных температур рабочего тела, а также относительного внутреннего КПД процесса.

Для теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), продуктами которой являются электрическая и тепловая энергия, расход условного топлива может быть определен многими способами (зависит от выбранного метода отнесения затрат на электрическую и тепловую энергию). Однако исходя из условия, что производство тепловой энергии не должно быть убыточным, наиболее оправданным является физический метод отнесения затрат. Когда удельный расход условного топлива на производство тепловой энергии  $b_{т,э}$  фиксируется на уровне 170–180 кг у. т./Гкал. В этом случае удельный расход условного топлива на производство электрической энергии может быть найден [5]:

$$B_{т,э} = b_{т,э}Q; \quad B_{э,э} = B - B_{т,э}; \quad b_{э,э} = \frac{B_{э,э}}{\mathcal{E}}, \quad (4)$$

где  $B$  – расход условного топлива на ТЭЦ за отчетный период, т у. т.;  $B_{т,э}$  – то же на производство тепловой энергии за отчетный период, т у. т.;  $Q$  – количество тепловой энергии, произведенной за отчетный период, Гкал;  $B_{э,э}$  – расход условного топлива на производство электрической энергии за отчетный период, т у. т.;  $\mathcal{E}$  – количество электрической энергии, произведенной за отчетный период, кВт·ч.

Таким образом, удельный расход условного топлива может отображать:

- эффективность использования топлива тепловым двигателем (в случае конденсационной станции), так как электрический КПД в этом случае равен коэффициенту использования топлива;
- структуру распределения затрат на производство электрической и тепловой энергии (в случае ТЭЦ).

Как показано выше, удельный расход условного топлива не может полностью отобразить экономическую эффективность использования различных видов топлива. Например, на химических производствах имеет место экзотермическое выделение теплоты в ходе реакции, где эта теплота является дополнительным энергетическим ресурсом, но не целевым продуктом. Для преобразования тепловой энергии пара может быть использована паровая машина (турбинная или поршневая), удельный расход условного топлива на производство электрической энергии на которой (конденсационный режим) будет существенно выше, чем в случае парогазовой технологии крупных электростанций. Однако можно ли сравнивать эти две технологии только с помощью удельного расхода условного топлива? Ведь в случае электростанции источником тепловой энергии для получения пара является горение топлива, а в случае использования тепловых отходов либо ВЭР топливо дополнительно не расходуется.

Другим примером может быть использование топлива, которое является побочным продуктом основного производства. Это имеет место для тех же деревообрабатывающих заводов, где образуются отходы древесины, которые можно применять в качестве топлива. Однако, как и в предыдущем примере, получать электрическую энергию возможно на технологиях с большим  $b_{7000}$ , чем на современных парогазовых электростанциях.

Таким образом, складывается ситуация: более дешевое топливо (иногда даже «бесплатное») можно использовать только на технологиях с более высоким  $b_{7000}$ , т. е. термодинамически менее совершенных. Однако это может оказаться гораздо выгоднее, чем использовать «дорогое» топливо (например, природный газ) на самых энергоэффективных (с минимальным  $b_{7000}$ ) теплотехнологиях.

Отсюда возникает необходимость в дополнительном показателе, в котором будут отражены и расход условного топлива  $b_{7000}$ , и стоимость первичного топлива для теплового двигателя.

Для учета стоимости топлива введем переводной коэффициент  $k$ , отображающий разницу в стоимости между конкретным видом энергии получения необходимых параметров рабочего тела на входе в тепловой двигатель (в частном случае – теплота сгорания топлива) и основным видом топлива, используемым для получения основной доли целевого продукта (тепловой и электрической энергии). В Республике Беларусь для производства электрической энергии базовым топливом может быть выбран природный газ

$$k = \frac{c_t}{c_r}, \quad (5)$$

где  $c_r$  – стоимость 1 т у. т. природного газа, дол./т у. т.;  $c_t$  – стоимость 1 т у. т. сравниваемого топлива, дол./т у. т.

Показатель, учитывающий стоимость топлива, обозначим  $b_c$

$$b_c = b_{7000}k, \quad (6)$$

где  $k$  – переводной коэффициент.

Этот показатель будет иметь те же единицы измерения, что и удельный расход условного топлива (для электрической энергии – кг у. т./кВт·ч); для тепловой – кг у. т./Гкал).

В табл. 3 приведена стоимость основных топлив, используемых в Республике Беларусь.

Таблица 3

Стоимость основных видов топлива

Топливо	Натуральная стоимость	Стоимость условного топлива $c_t$ , дол./т у. т.	Переводной коэффициент $k$
Природный газ (типовой)	260 дол./тыс. м <sup>3</sup>	227,50	1
Фрезерный торф (покупка у сторонней организации)	30 дол./т	83,71	0,37
Фрезерный торф (на торфобрикетном заводе)	7 дол./т	19,53	0,09

Древесина (покупка у сторонней организации)	30 дол./т	101,04	0,44
Древесные отходы (на площадке деревообрабатывающего предприятия)	5 дол./т	16,84	0,08
Мазут	255 дол./т	190,11	0,84
Дизельное топливо	700 дол./т	480,33	2,11

Для получения полной картины о целесообразности использования полученного показателя приведем простой пример. Допустим, на предприятии химической отрасли в ходе реакции получения серной кислоты экзотермически выделяется тепловая энергия. Утилизация происходит за счет получения пара давлением порядка 4,0 МПа и температурой 350 °С. Ее достаточно для получения на паровой турбине в конденсационном режиме 3 МВт электрической энергии. Проведем оценку народнохозяйственной значимости данного мероприятия с различных точек зрения:

- использования  $b_{7000}$ ;
- использования  $b_c$ .

Параметры для сравнения приводим в табл. 4.

В качестве объектов для сравнения и получения народнохозяйственного эффекта выбраны: Лукомльская ГРЭС – основной поставщик электрической энергии в Республике Беларусь; Минская ТЭЦ-5 – самая эффективная электростанция в Республике Беларусь. В качестве топлива для них используется природный газ.

Таблица 4

**Параметры сравнения народнохозяйственного эффекта**

Параметр	Лукомльская ГРЭС	Минская ТЭЦ-5	Использование ВЭР
Электрический КПД, %	42	58	25
Удельный расход условного топлива $b_{3,3}$ , кг у. т./кВт·ч	0,292	0,200	0,492
Переводной коэффициент	1,00	1,00	0,03
Электрическая мощность, МВт	3	3	3
Годовое производство электрической энергии, млн кВт·ч	24	24	24

Для оценки народнохозяйственной значимости воспользуемся двумя методами. Результаты расчетов по экономии условного топлива при использовании различных теплотехнологий сведены в табл. 5.

Таблица 5

**Результаты расчетов по экономии условного топлива (сравнение Минской ТЭЦ-5 с Лукомльской ГРЭС)**

Параметр	Минская ТЭЦ-5	Лукомльская ГРЭС	Использование ВЭР
Потребление условного топлива $B$ , тыс. т у. т.	4,8	7,01	11,81
Экономия условного топлива $B$ , тыс. т у. т.	7,01	4,80	–

Результаты народнохозяйственного эффекта Минской ТЭЦ-5 и Лукомльской ГРЭС приведены в табл. 6.

Таблица 6

**Оценка народнохозяйственного эффекта  
(сравнение Минской ТЭЦ-5 с Лукомльской ГРЭС)**

Параметр	Минская ТЭЦ-5	Лукомль- ская ГРЭС	Используй- вание ВЭР
Потребление условного топлива с учетом стоимости топлива $b_c$ , тыс. т у. т.	4,8	7,01	0,35
Перерасход условного топлива $b_c$ , тыс. т у. т.	4,45	6,66	–

**ВЫВОД**

Удельный расход условного топлива на производство электрической и тепловой энергии является важнейшим показателем для оценки эффективности преобразования энергии топлива (теплотворной способности) в целевой продукт (электрическую и тепловую энергию). Однако для сравнения экономической эффективности использования различных видов топлива в тепловых двигателях необходимо введение дополнительного коэффициента  $b_c$ , учитывающего стоимость 1 т у. т. для конкретного топлива.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. А г е н т с т в о ProAtom [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.proatom.ru](http://www.proatom.ru) – Дата доступа: 04.07.2010.
2. Т р и г е н е р а ц и я [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.combienergy.ru](http://www.combienergy.ru) – Дата доступа: 03.06. 2010.
3. К о г е н е р а ц и я. Ру [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.cogeneration.ru](http://www.cogeneration.ru) – Дата доступа: 5.05.2010.
4. Х р у с т а л е в, Б. М. Техническая термодинамика: учеб. в 2 ч. – Ч. 2 / Б. М. Хрусталев, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск: УП «Технопринт», 2004.
5. Г а з о т у р б и н н ы е и парогазовые установки тепловых электростанций: учеб. пособие для вузов / под ред. С. В. Цанева. – М.: Изд-во МЭИ, 2002.

Представлена кафедрой ПТЭ и ТТ

Поступила 20.09.2010

УДК 685.659.1+536.48

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ  
ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДОВОГО ПОЛЯ**

Асп. ЛИВАНСКИЙ Д. Г.

*Белорусский национальный технический университет*

Сформировать ледовое поле с заданными свойствами возможно при:

- соблюдении технологии заливки, обеспечивающей высокое качество льда;
- оптимальной конструкции ледового основания (рис. 1);