

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

**П.Э. РАТНИКОВ**, канд. техн. наук  
Белорусский национальный технический университет  
**С.М. КАБИШОВ**, канд. техн. наук  
Министерство промышленности Республики Беларусь

*Представлена методика расчета эффективности применения топливных и электрических источников энергии в нагревательных, термических и химико-термических печах с точки зрения минимизации стоимости обработки. Методика позволяет оценивать равностоимостные коэффициенты полезного действия для топливных и электрических печей, эксплуатируемых при различных режимах работы и при различной загрузке оборудования, а также при различных тарифах и способах оплаты за электроэнергию, что позволит принимать решение об использовании источника энергии.*

**Ключевые слова:** топливные и электрические печи, равностоимостной коэффициент полезного действия, энергоэффективность.

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF APPLICATION OF FUEL AND ELECTRIC FURNACES OF THERMAL AND CHEMICAL-THERMAL TREATMENT**

**P.E. RATNIKOV**, Ph. D in Technical Sciences,  
Belarusian National Technical University  
**S.M. KABISHOV**, Ph. D in Technical Sciences,  
Ministry of Industry of the Republic of Belarus

*A method for calculating the efficiency of using fuel and electric energy sources in heating, thermal and chemical-thermal furnaces from the point of view of minimizing the cost of processing is presented. The methodology makes it possible to evaluate the equal-value efficiency for fuel and electric furnaces operated under different operating modes and with different equipment loads, as well as with different tariffs and methods of payment for electricity, which will make it possible to make a decision on the use of an energy source.*

*Keywords: fuel and electric furnaces, equal value efficiency, energy efficiency.*

**Введение.** В настоящее время постоянно рассматриваются вопросы о целесообразности применения топливного или электрического способов отопления промышленных высокотемпературных установок, в частности нагревательных, термических и химико-термических печей. Выбор источника энергии в каждом случае представляет существенную сложность, так как при этом необходимо учитывать специфику конкретного производства, его расположение, наличие на территории предприятия (или в регионе) линий энергетических коммуникаций и т. д.

При выборе источника энергии для высокотемпературного теплотехнологического оборудования необходимо решить ряд задач, таких как:

- определиться с существующими коммуникациями энергоносителей, при их отсутствии – со стоимостью проведения, наличием местных источников топлива, возможностью увеличения установленной мощности на предприятии;

- рассчитать капитальные и эксплуатационные затраты на основное и вспомогательное оборудование;

- вычислить величину удельных энергозатрат и себестоимость тепловой обработки при использовании различных источников энергии;

- рассмотреть возможность полной автоматизации технологического процесса, выбрать способ отопления, обладающий высокой точностью регулирования температурно-тепловых режимов работы печных установок;

- оценить экологические показатели работы высокотемпературных агрегатов (снижение нагрузки на окружающую среду на предприятии и в целом по региону);

- решить вопрос безопасности осуществления технологического процесса;

- рассмотреть экономическую целесообразность функционирования предприятия (обеспеченность региона (страны) соответствующими топливно-энергетическими ресурсами) на текущий момент и на перспективу.

Также при выборе источников энергии для высокотемпературных теплотехнических установок необходимо учитывать возможно-

сти использования электроэнергии за счет Островецкой АЭС и наличие свободных электрических мощностей национальной энергосистемы.

Однозначный вывод о преимуществе того или иного способа нагрева в условиях конкретного производства может быть сделан на основании детального анализа вышеописанных задач.

Каждому из рассматриваемых способов использования энергии присущи свои преимущества и недостатки. Например, для электрических нагревательных и термических печей характерны [1]: высокая точность соблюдения температурного режима, легкость автоматизации, более низкие капитальные и эксплуатационные издержки, улучшенные условия работы персонала на рабочих местах (значительно меньший уровень шума, пыли, дыма). В то же время применение углеводородного топлива обеспечивает меньшую стоимость тепловой обработки (при использовании печей современных конструкций с высокой утилизацией вторичных энергоресурсов, современными горелочными устройствами и низкоинерционной футеровкой).

**Результаты расчетного анализа.** Ниже предложена методика оценки эксплуатационных (энергетических) показателей работы печей при использовании топливного и электрического источников энергии.

Стоимость отопления топливом или за счет потребления электроэнергии будут определяться соответствующим потреблением данных ресурсов

$$\begin{aligned} S_T &= C_T B_T; \\ S_э &= C_э W_э, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $C_T$  и  $C_э$  – тарифы на топливо и электроэнергию, руб/м<sup>3</sup>, руб/кг, руб/(кВт·ч) для предприятий;  $B_T$  и  $W_э$  – соответственно расходы топлива и электрической энергии на цикл тепловой обработки или за определенный период времени, м<sup>3</sup>, кг или кВт·ч.

Расходы топлива и электроэнергии напрямую связаны с конструкциями печей и видом тепловой обработки. Одним из параметров, характеризующих их работу, является коэффициент полезного действия (КПД), который определяет долю энергии, расходуемой на

полезную работу, к общей энергии, поступившей в тепловой агрегат (и выделившейся в агрегате)

$$\begin{aligned} Q_M &= \eta_T Q_T = B_T \eta_T Q_H^P; \\ Q_M &= \eta_3 W, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\eta_T$  и  $\eta_3$  – соответственно коэффициенты полезного действия топливной и электрической печи (коэффициенты топливо- и энергоиспользования);  $Q_M$  – теплота, поглощенная материалом, МДж;  $Q_H^P$  – теплотворная способность топлива, МДж/м<sup>3</sup> или МДж/кг.

С учетом (2) формулы (1) приобретут вид

$$\begin{aligned} S_T &= C_T \frac{Q_M}{\eta_T Q_H^P}; \\ S_3 &= C_3 \frac{Q_M}{\eta_3}. \end{aligned} \quad (3)$$

Если электроэнергия производится на тепловых электростанциях, т. е. путем сжигания первичного топлива, то запишем

$$W_3 = \eta_1 \eta_2 \eta_3 B_T, \quad (4)$$

где  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\eta_3$  – соответствующие коэффициенты полезного действия при получении электроэнергии на ТЭС, передачи электроэнергии (потери в сетях) и трансформации электроэнергии в преобразователях (трансформаторах и т. д.). Стоимость отопления в пересчете на первичное топливо в данном случае будет составлять

$$\begin{aligned} S_3 &= C_3 W_3 = C_T \eta_1 \eta_2 \eta_3 B_T; \\ S_3 &= C_T \frac{Q_M}{\eta_3 \eta_1 \eta_2 \eta_3 Q_H^P}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для корректного сравнения стоимости отопления при использовании топлива и электроэнергии необходимо ввести коэффициент соответствия тепловой и электрических видов энергии

$$K = 3,6 \text{ МДж}/(\text{кВт}\cdot\text{ч}).$$

Таким образом, отношение стоимости использования в печи топлива и электроэнергии будет иметь вид (при одинаковой полезной работе)

$$\frac{S_T}{S_э} = \frac{C_T}{C_э} \frac{K\eta_э}{\eta_T Q_H^P} . \quad (6)$$

При пересчете на цену первичного топлива получаем

$$\frac{S_T}{S_э} = \frac{\eta_э \eta_1 \eta_2 \eta_3}{\eta_T} . \quad (7)$$

Если приравнять левую часть выражения к единице, то можно определить «эквивалентные по стоимости» КПД для электрического и топливного способа отопления, которые обеспечивают одинаковый уровень энергозатрат на тепловую обработку

$$\eta_T = \eta_э \frac{C_T}{C_э} \frac{K}{Q_H^P} ; \quad (8)$$

$$\eta_T = \eta_э \eta_1 \eta_2 \eta_3 ,$$

где значение  $\eta_э$  показывает долю теплоты от сжигания первичного топлива, поступившего в печь с электроэнергией. Из него определяются «эквивалентные» КПД топливных и электрических печей при пересчете на первичное топливо (рисунок 1).

Для расчета «стоимостного эквивалента» отопления рассмотрим пример отопления термической печи природным газом и электроэнергией. По данным РУП «Минскэнерго», филиал «Энергосбыт» [2] стоимость электроэнергии без НДС для крупных промышленных предприятий (присоединенная мощность превышает 750 кВА) составляет 0,19146 руб./ (кВт·ч) (с НДС 0,229752); плата за установленную мощность – 22,64 руб./кВт без НДС или 27,168 с НДС. Для малых промышленных предприятий мощностью меньше 750 кВА применяется одноставочный тариф и стоимость электроэнергии составляет 0,24295 руб./ (кВт·ч) (0,29154). Тариф на природный газ составляет 555,21 руб./1000 м<sup>3</sup> без НДС (666,252 руб./1000 м<sup>3</sup> с НДС) [2]. Средний коэффициент полезного действия ТЭС (ТЭЦ) примем равным 44 %, средние тепловые потери в сети – 9 %, потери

электроэнергии в трансформаторах и иных преобразователях – 5 %. Учтем, что по данным [2] энергетическая ценность 1000 м<sup>3</sup> природного газа составляет 1,154 тут, а 1000 кВт·ч – 0,123 тут (тут – тонна условного топлива). Или 1 тут эквивалентна соответственно 870 м<sup>3</sup> природного газа и 8130 кВт·ч электроэнергии (энергетический эквивалент 1 м<sup>3</sup> природного газа равен 9,35 кВт·ч).

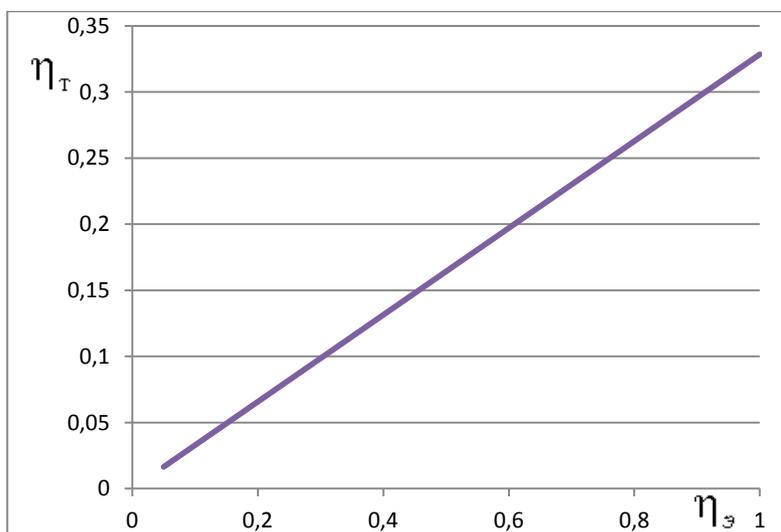


Рисунок 1 – Соответствие КПД топливной и электрической печи по первичному топливу (энергетическое соответствие)

Запишем выражение (8) через условное топливо

$$\eta_T = \eta_{\text{э}} \frac{C_T}{C_{\text{э}}} \frac{K}{Q_H^p} = \eta_{\text{э}} \frac{C_T}{C_{\text{э}}} \frac{G_T}{G_{\text{э}}}, \quad (9)$$

где  $G_T$  и  $G_{\text{э}}$  – соответственно количество м<sup>3</sup> природного газа и кВт·ч, эквивалентных 1 тут. Расчеты проведем без НДС. Подставив вышеприведенные данные, получим:

– для крупных предприятий

$$\eta_T = \eta_{\text{э}} \frac{870 \text{ м}^3 \cdot 0,555 \text{ руб/м}^3}{8130 \text{ кВтч} \cdot 0,191} = 0,31\eta_{\text{э}};$$

– для малых предприятий (по одноставочному режиму)

$$\eta_{\tau} = \eta_{\varepsilon} \frac{870 \text{ м}^3 \cdot 0,555 \text{ руб/м}^3}{8130 \text{ кВтч} \cdot 0,24925} = 0,238\eta_{\varepsilon}.$$

Соответствия КПД для топливной и электрической печи при различных способах учета электроэнергии приведены на рисунке 2.

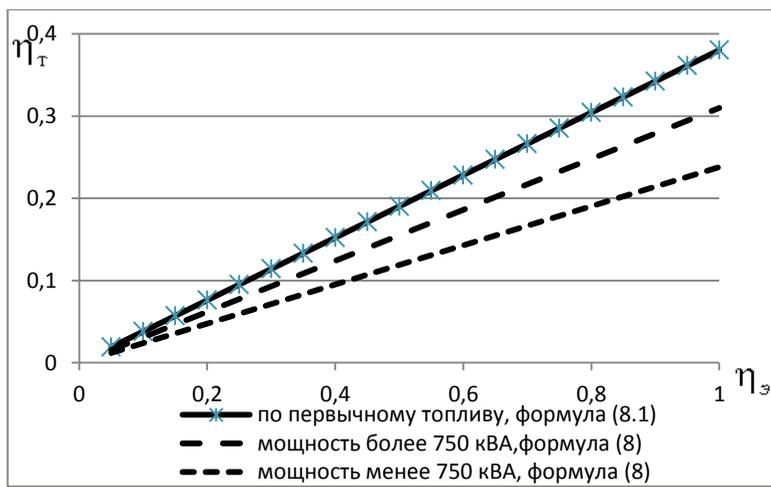


Рисунок 2 – Соответствия КПД топливной и электропечи печи по энергетическому эквиваленту и стоимости отопления

Формула (8) применима для оценочных расчетов. Она может применяться при оплате работы электропечей по одноставочному тарифу.

Если предприятие производит оплату по двухставочному тарифу, то выражение (3) приобретает вид:

$$S_T = C_T \frac{Q_M}{\eta_T Q_H^P} + C_9 W_{\text{э\_пр}} + C_{y.m} N_{\text{э\_пр}} k_3; \quad (10)$$

$$S_9 = C_9 \frac{Q_M}{K \eta_9} + C_{y.m} N_{\text{п}} k_3,$$

где  $W_{\text{э\_пр}}$  – электроэнергия потребляемая электроприводами систем подачи воздуха, дымоудаления, систем управления печи, кВт·ч;  $N_{\text{э\_пр}}$  – мощность, потребляемая топливной печью, кВт;  $N_{\text{п}}$  – мощность электропечи;  $k_3$  – отношение заявленной мощности к установленной;  $C_{y.m}$  – плата за установленную мощность, руб/(кВт·мес).

Энергию, затраченную на работу вентиляторов воздушных горелок и приводов дымососов, можно найти из выражения, приведенного в работе [3]. Так, расход энергии для работы вентиляторов подачи в зону горения окислителя и работы дымохода может быть оценен исходя из уравнения течения идеальной жидкости (уравнение Бернулли) без учета (в силу малости диссипации) энергии, связанной с вязкостью воздуха и потерями в дутьевом механизме. Для реальных условий следует учесть коэффициент повышения мощности  $k_2$  в зависимости от условий работы (при температуре окружающей среды  $t_{o.c.} = 20$  °С и высоте над уровнем моря до 1000 м ( $k_1 = 1,2$ ), коэффициент запаса по производительности и напору ( $k_2 = 1,2$ ), а также КПД дутьевого вентилятора (примем  $\eta_B = 0,7$ ). Тогда запишем

$$E = \frac{k_1 k_2}{\eta_B} \left( \sum_{i=1}^I p_{Ti} V_{Ti} + \sum_{i=1}^I p_{Vi} V_{Vi} + p_d V_d \right) = \quad (11)$$

$$= 2,06 \left( \sum_{i=1}^I p_{Ti} V_{Ti} + \sum_{i=1}^I p_{Vi} V_{Vi} + p_d V_d \right),$$

где  $p_{Vi}$ ,  $p_{Ti}$  и  $p_d$  – соответственно избыточные давления воздуха и топлива в  $i$ -той горелке (газовоздушной смеси для кинетических горелок) и дымовых газов, Па;  $V_{Vi}$ ,  $V_{Ti}$  и  $V_d$  – соответственные расходы воздуха и топлива в  $i$ -й горелке (газовоздушной смеси) и дымовых газов, м<sup>3</sup>/с (в пересчете на нормальные условия).

Давления воздуха и дымососа являются характеристиками горелочных устройств, а объемы воздуха и продуктов горения – функ-

цией используемого топлива. Так, например, при сжигании природного газа относительные объемы воздуха составляют примерно  $10 \text{ м}^3/\text{м}^3 B$ , дыма  $11 \text{ м}^3/\text{м}^3 B$  ( $B$  – расход газа).

Соответственно уравнения (10) примут вид

$$S_T = C_T \frac{Q_M}{\eta_T Q_H^p} + \frac{2,06C_3 \left( \sum_{i=1}^I p_{Ti} V_{Ti} + \sum_{i=1}^I p_{Vi} V_{Vi} + p_d V_d \right)}{K} + C_{y.m} N_{3,пр} k_3; \quad (12)$$

$$S_3 = C_3 \frac{Q_M}{K \eta_3} + C_{y.m} N_{п} k_3.$$

Учтем, что реальные объемы воздуха и продуктов сгорания с учетом коэффициентов температурного расширения равны

$$k_{тв} = \frac{t_B + 273}{293}; \quad k_{тд} = \frac{t_d + 273}{293},$$

и

$$V_{Vi} = k_{тв} L_B B_i, \quad V_{Ti} = B_i \quad \text{и} \quad V_d = k_{тд} L_d B, \quad B_i = \varepsilon_i B,$$

где  $\varepsilon_i$  – доля топлива, сжигаемого в  $i$ -той горелке (по сути представляет собой распределение тепловой мощности по печному пространству);  $k_{тв}$  и  $k_{тд}$  – коэффициенты температурного расширения воздуха и дымовых газов соответственно;  $t_B$  и  $t_d$  – температуры подогретого воздуха и отходящих газов соответственно, °C;  $L_B$  и  $L_d$  – действительные объемы воздуха и дыма при сжигании топлива,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Тогда получим

$$S_T = C_T \frac{Q_M}{\eta_T Q_H^p} + \frac{2,06C_3 \left( \sum_{i=1}^I p_{Ti} \varepsilon_i B_T + \sum_{i=1}^I p_{Vi} k_{тв} L_B \varepsilon_i B_T + p_d k_{тд} L_d B_T \right)}{K} + C_{y.m} N_{3,пр} k_3.$$

Учтем, что  $B_T = \frac{Q_M}{\eta_T Q_H^p}$ , тогда

$$S_T = \left[ C_T + \frac{2,06C_3 \left( \sum_{i=1}^I p_{Ti} \varepsilon_i + \sum_{i=1}^I p_{Vi} k_{iB} L_B \varepsilon_i + p_D k_{iD} L_D \right)}{K} \right] \frac{Q_M}{\eta_T Q_H^P} +$$

$$+ C_{y.M} N_{э\_пр} k_3; \quad (13)$$

$$S_э = C_э \frac{Q_M}{K \eta_э} + C_{y.M} N_{п} k_3.$$

Третье слагаемое формулы (13) для топливных печей ( $C_{y.M} N_{э\_пр} k_3$ ), т. е. плата за установленную мощность, пренебрежимо мало по сравнению с предыдущими. Например, дымососы серии Д-3,5 имеют следующие характеристики [4]: потребляемая мощность 3 кВт; избыточное давление 48 Па; производительность 4300 м<sup>3</sup>/ч. При отоплении природным газом этому соответствует печь с тепловой нагрузкой

$$E = \frac{4300 \text{ м}^3/\text{ч}}{3600 \text{ с}} \frac{1}{10 \text{ м}^3/\text{м}^3} \cdot 33 \text{ МДж}/\text{м}^3 = 3,94 \text{ МВт}.$$

Плата за установленную мощность при этом составит (при  $k_3 = 1$ )

$$C_{y.M} N_{э\_пр} k_3 = 27,168 \cdot 3 \cdot 1 = 81,5 \text{ руб./мес.}$$

Очевидно, что это является незначительной суммой и при дальнейших сравнениях эффективности использования топливного или газового отопления этим слагаемым можно пренебречь (затраты только на топливо при этом составят 143190 руб./мес.). Если приравнять уравнения (13) к единице продукции (1 т) и пренебречь платой за мощность при топливном нагреве, то соотношение стоимостей отопления при топливном и электрическом нагреве будет иметь вид

$$\frac{S_T}{S_3} = \frac{\left[ C_T + \frac{2,06C_3 \left( \sum_{i=1}^I p_{Ti} \varepsilon_i + \sum_{i=1}^I p_{Vi} k_{iB} L_B \varepsilon_i + p_d k_{iD} L_d \right)}{K} \right] \frac{Q_M}{\eta_T Q_H^p}}{C_3 \frac{Q_M}{K \eta_3} + \frac{C_{y.M} N_{II} k_3}{\Pi_M}}, \quad (14)$$

где  $\Pi_M$  – месячный план производства, т/мес.

Формула (14) позволяет определить отношения стоимостей отопления топливом и при использовании электроэнергии при максимальной загрузке печного оборудования. Однако в производственных условиях печи могут эксплуатироваться с непостоянной нагрузкой (например, работа в одну или две смены или с неполной загрузкой оборудования). Причем степень загрузки оборудования не влияет на величину оплаты за установленную мощность. Поэтому появляется необходимость учета степени загрузки оборудования.

Степень загрузки оборудования можно выразить через производительность печи, фонд рабочего времени и производственную программу

$$K_{\text{загр}} = \frac{\Pi_M}{\mathcal{F} \cdot P}, \quad (15)$$

где  $\mathcal{F}$  – фонд работы оборудования в месяц, ч/мес.;  $P$  – производительность т/ч.

Полезная теплота равна

$$Q_M = P(i_k - i_n) = P \Delta i,$$

где  $i_k$  и  $i_n$  – конечная и начальная энтальпии металла.

При нагреве (термообработке) с холодного посада  $Q_M = P i$ .

Также необходимо учесть, что заявленная мощность электропечей всегда больше их номинальной (потребляемой) мощности на 10–30 % [5], т. е. вводится коэффициент запаса мощности  $k_{\text{зап}}$

$$N_{II} = k_{\text{зап}} N_{\text{потр.}}$$

Тогда КПД электропечи равно

$$\eta_{\text{э}} = C_{\text{э}} \frac{Pi}{KN_{\text{потр}}}$$

При подстановке этих выражений в формулу (14) получим

$$\frac{S_{\text{Т}}}{S_{\text{э}}} = \frac{\eta_{\text{э}}}{\eta_{\text{Т}}} \left[ \frac{C_{\text{Т}} + \frac{2,06C_{\text{э}} \left( \sum_{i=1}^I p_{\text{Ti}} \varepsilon_i + \sum_{i=1}^I p_{\text{Bi}} k_{\text{TB}} L_{\text{B}} \varepsilon_i + p_{\text{д}} k_{\text{TD}} L_{\text{д}} \right)}{K}}{1} \right] \frac{1}{Q_{\text{H}}^{\text{P}}} \cdot \left( \frac{C_{\text{э}}}{K} + \frac{C_{\text{у.м}}}{K} \frac{k_3 k_{\text{зап}}}{\text{ЧК}_{\text{загр}}} \right). \quad (16)$$

Из уравнения (16) можно определить КПД газовых и электрических печей, которые при равной полезной работе будут обеспечивать одинаковую стоимость отопления при расчете за электроэнергию по двухставочному тарифу

$$\eta_{\text{Т}} = \eta_{\text{э}} \left[ \frac{C_{\text{Т}} + \frac{2,06C_{\text{э}} \left( \sum_{i=1}^I p_{\text{Ti}} \varepsilon_i + \sum_{i=1}^I p_{\text{Bi}} k_{\text{TB}} L_{\text{B}} \varepsilon_i + p_{\text{д}} k_{\text{TD}} L_{\text{д}} \right)}{K}}{1} \right] \frac{1}{Q_{\text{H}}^{\text{P}}} \cdot \left( \frac{C_{\text{э}}}{K} + \frac{C_{\text{у.м}}}{K} \frac{k_3 k_{\text{зап}}}{\text{ЧК}_{\text{загр}}} \right). \quad (17)$$

Ниже приведены результаты расчетов равностоимостных КПД работы топливных и электрических печей при оплате за электроэнергию по двухставочному тарифу. В качестве примера примем следующие исходные данные: топливо – природный газ с теплотой сгорания 33,1 МДж/м<sup>3</sup>; стоимость электроэнергии без НДС составляет 0,19146 руб./кВт·ч (с НДС 0,229752); плата за установленную мощность – 22,64 руб./кВт без НДС или 27,168 с НДС [2]; тариф на природный газ – 555,21 руб./1000 м<sup>3</sup> без НДС (666,252 руб./1000 м<sup>3</sup> с НДС) [2]; годовой фонд работы оборудования при 40-часовой рабочей неделе – 255 дней или 2032 ч (данные на 2020 год [6]), что в

переводе на месяц составит: 170 ч при работе в 1 смену; 340 ч – в две смены; 510 ч – в 3 смены. Относительные объемы воздуха и продуктов сгорания принимаются равными  $L_v = 10 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ,  $L_d = 11 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; давления газозвушной смеси и продуктов сгорания составляют соответственно 1000 Па и 50 Па. При расчетах не будем учитывать НДС, так как отношение стоимостей при этом не изменится. Результаты расчетов представлены на рисунке 3.

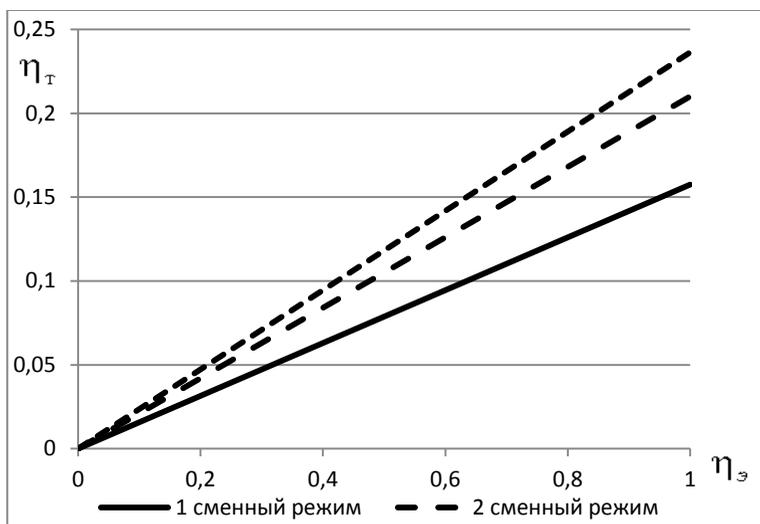


Рисунок 3 – Линии равностоимостных КПД печей отапливаемой газом и электроэнергией при одинаковой полезной работе при различном количестве смен работы оборудования (коэффициент загрузки оборудования 0,8)

Для оценки эффективности работы электропечей, работающих с малой нагрузкой, проведены расчеты работы оборудования в односменном режиме работы с коэффициентами загрузки оборудования 30, 60 и 90 %. Результаты расчетов приведены на рисунке 4.

Определим влияние коэффициента загрузки оборудования  $K_{\text{загр}}$  на отношение равностоимостных КПД топливных и нагревательных печей при различных режимах их работы (работа в 1, 2 и 3 смены).

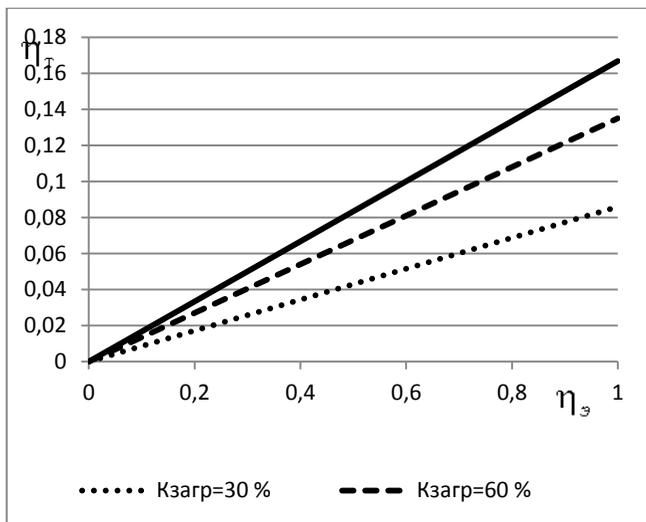


Рисунок 4 – Линии равностоимостных КПД газовой и электрической печи, работающих в 1 сменном режиме, с коэффициентом загрузки оборудования 30 %, 60 %, 90 %

Для этого уравнение (17) представим в виде

$$\eta_{\text{г}} = \eta_{\text{э}} K_{\text{соотв}}, \quad (18)$$

где  $K_{\text{соотв}} = \eta_{\text{г}}/\eta_{\text{э}}$ ,  $K_{\text{соотв}} = f(C_{\text{э}}, C_{\text{т}}, Q_{\text{н}}^{\text{п}}, k_3, k_{\text{зап}}, K_{\text{загр}}, \text{Ч})$ .

Здесь  $K_{\text{соотв}}$  – отношение КПД топливной (работающей на природном газе) и электропечи при прочих равных условиях.

Результаты расчетов приведены на рисунке 5.

Определим долю затрат на оплату заявленной мощности в общей стоимости электронагрева при работе печного оборудования при различном фонде времени и с разными коэффициентами загрузки оборудования. Для этого из уравнения (17) получим:

$$\Delta = \frac{\frac{C_{\text{у.м}}}{\text{К}} + \frac{k_3 k_{\text{зап}}}{\text{ЧК}_{\text{загр}}}}{\frac{C_{\text{э}}}{\text{К}} + \frac{C_{\text{у.м}}}{\text{К}} + \frac{k_3 k_{\text{зап}}}{\text{ЧК}_{\text{загр}}}}.$$

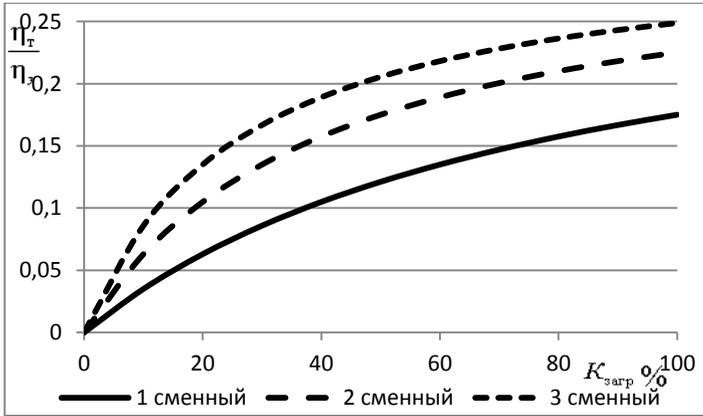


Рисунок 5 – Отношение равностоимостных КПД для газовой и электрических печей, работающих в 1, 2 и 3 смены, при различных коэффициентах загрузки оборудования и при оплате за электроэнергию по двухставочному тарифу

Результаты расчетов представлены на рисунке 6.

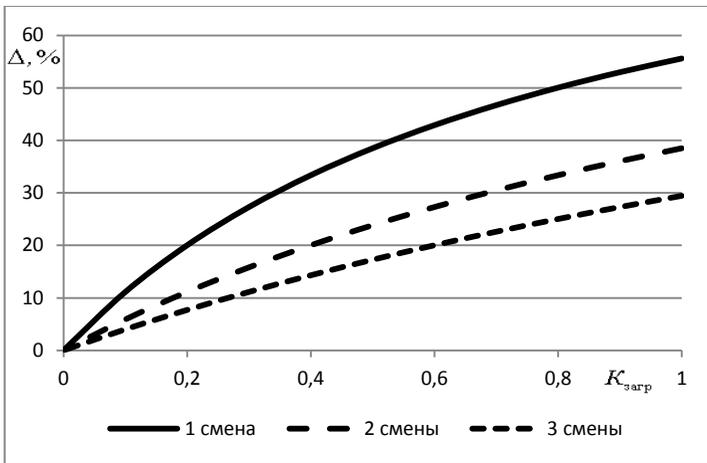


Рисунок 6 – Доля затрат на оплату заявленной мощности в общей стоимости электронагрева при работе печного оборудования при различном фонде времени и с разными коэффициентами загрузки оборудования

Как видно из рисунка 6, при работе электропечей с коэффициентом загрузки 80–90 % (трехсменный режим вместо односменного) доля платы за установленную мощность снижается с 50–52 % до 25–27 %.

Как известно, ценообразование на рынках энергоресурсов складывается, в том числе, и от соотношений спроса и предложения на энергоресурсы и от цены на их заменители. Эти колебания цен могут оказывать влияние на отношения эксплуатационных расходов газовых и электрических печей. Оценим влияние динамики цен на газ и электроэнергию на равностоимостные КПД электрических и газовых печей. Например, стоимость покупки природного газа для Республики Беларусь в 2021 году составляет 128 долларов США за 1000 м<sup>3</sup>. При этом предприятия покупают природный газ по цене 555,21 руб./1000 м<sup>3</sup> (данные на 01.01.20, тариф указан при соотношении курса белорусского рубля к доллару США 2,1085:1 [2]), что эквивалентно 263,32 долларам США за 1000 м<sup>3</sup>. На рисунке 7 приведены равностоимостные КПД газовых и электрических печей при различной стоимости природного газа и цене за 1 кВт·ч = 0,191 руб. (без НДС). Коэффициент загрузки оборудования принят  $K_{з\text{арг}} = 0,7$ .

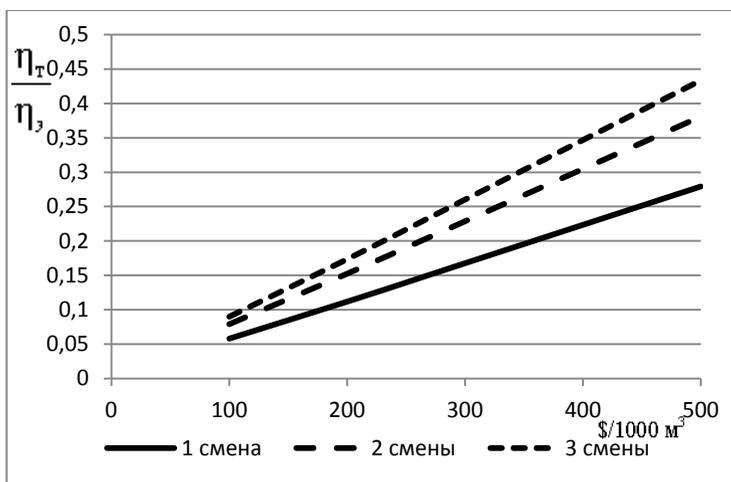


Рисунок 7 – Равностоимостные КПД газовых и электрических печей при различной стоимости природного газа

Как видно из рисунка 7, повышение стоимости природного газа до 500 \$ за 1000 м<sup>3</sup> повышает равностоимостной КПД газовых печей практически вдвое.

На рисунке 8 показаны равностоимостные КПД газовых и электрических печей при стоимости природного газа 555,21 руб./1000 м<sup>3</sup> [2] и различной стоимости электроэнергии (стоимость электрической энергии для промышленных предприятий составляла в 2019 году от 0,07 евро в Грузии до 0,2036 в Германии [7]). Коэффициент загрузки оборудования принят равным  $K_{з\text{арп}} = 0,7$ . По данным на 01.01.20 при соотношении курса белорусского рубля к доллару США 2,1085:1 [2] стоимость электроэнергии составляла 0,0905 \$/кВт·ч.

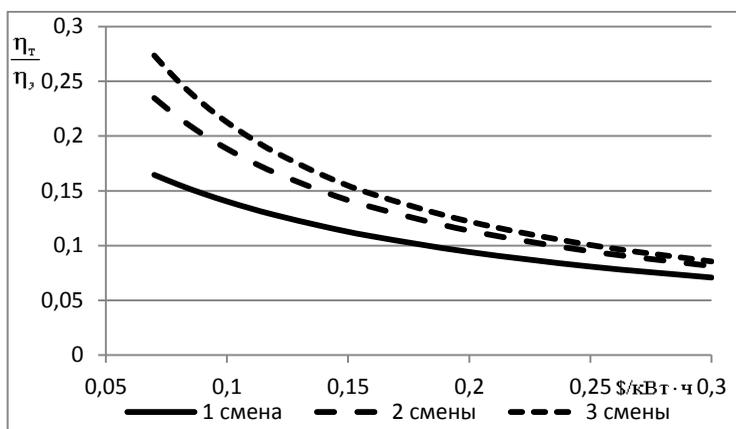


Рисунок 8 – Равностоимостные КПД газовых и электрических печей при стоимости природного газа 555,21 руб./1000 м<sup>3</sup> и различной стоимости электроэнергии

Для более полного сравнения эффективности использования топливных и электрических термических (химико-термических) печей необходимо учесть, помимо энергетических, еще и капитальные затраты (стоимость оборудования, затраты на подвод энергетических и других коммуникаций), эксплуатационные затраты (затраты на техническое обслуживание, плановые и предупредительные ремонты) и заработную плату обслуживающего персонала. В этом случае стоимость тепловой обработки можно определить по выражениям

$$S_T = C_T \frac{Q_M}{\eta_T Q_H^p} + C_{\text{э}} W_{\text{э\_пр}} + C_{\text{у.м}} N_{\text{э\_пр}} k_{\text{э}} + \frac{C_{\text{к.т}} + C_{\text{э.т}} + C_{\text{з.т}}}{\sum_{j=1}^m \Pi_{\text{Мj}}};$$

$$S_{\text{э}} = C_{\text{э}} \frac{Q_M}{K \eta_{\text{э}}} + C_{\text{у.м}} N_{\text{п}} k_{\text{э}} + \frac{C_{\text{к.э}} + C_{\text{э.э}} + C_{\text{з.э}}}{\sum_{i=1}^n \Pi_{\text{Mi}}}$$

или

$$S_T = \left[ C_T + \frac{2,06 C_{\text{э}} \left( \sum_{i=1}^I p_{\text{Ti}} \varepsilon_i + \sum_{i=1}^I p_{\text{Vi}} k_{\text{TB}} L_{\text{B}} \varepsilon_i + p_{\text{д}} k_{\text{TD}} L_{\text{д}} \right)}{K} \right] \frac{Q_M}{\eta_T Q_H^p} +$$

$$+ C_{\text{у.м}} N_{\text{э\_пр}} k_{\text{э}} + \frac{C_{\text{к.т}} + C_{\text{э.т}} + C_{\text{з.т}}}{\sum_{j=1}^m \Pi_{\text{Мj}}};$$

$$S_{\text{э}} = C_{\text{э}} \frac{Q_M}{K \eta_{\text{э}}} + C_{\text{у.м}} N_{\text{п}} k_{\text{э}} + \frac{C_{\text{к.э}} + C_{\text{э.э}} + C_{\text{з.э}}}{\sum_{i=1}^n \Pi_{\text{Mi}}},$$

где  $C_{\text{к.т}}$  – капитальные затраты за нормативный период эксплуатации топливной печи, руб;  $C_{\text{э.т}}$  – эксплуатационные затраты за нормативный период эксплуатации топливной печи, руб;  $C_{\text{к.э}}$  – капитальные затраты за нормативный период эксплуатации электрической печи, руб;  $C_{\text{э.э}}$  – эксплуатационные затраты за нормативный период эксплуатации электрической печи, руб;  $C_{\text{з.т}}$  – заработная плата персонала, обслуживающего топливную печь;  $C_{\text{з.э}}$  – заработная плата персонала, обслуживающего электрическую печь;  $\sum_{j=1}^m \Pi_{\text{Мj}}$  – суммарный объем производства продукции за нормативный период эксплуатации топливной печи, т;  $\sum_{i=1}^n \Pi_{\text{Mi}}$  – суммарный объем производства продукции за нормативный период эксплуатации электри-

ческой печи, т;  $n$  – продолжительность эксплуатации электрической печи, мес.;  $m$  – продолжительность эксплуатации топливной печи, мес.

Капитальные, эксплуатационные затраты и оплата труда персоналу зависят от производителей оборудования, степени автоматизации печи, применяемых материалов и особенностей конкретных производств и даже социальных трудовых факторов, поэтому их оценить возможно только в случае предоставления полной картины этих данных.

**Заключение.** При работе термических и химико-термических печей в условиях малых предприятий (с установленной мощностью менее 750 кВА), когда оплата за электроэнергию осуществляется по одноставочному тарифу, применение электропечей (КПД таких печей находится в пределах 60–80 %) соответствует применению газовых печей с КПД порядка 14–20 %. При КПД газовых печей свыше 20 % их эксплуатация становится экономически более выгодной. При эксплуатации термических печей на крупных промышленных предприятиях (с установленной мощностью более 750 кВА) целесообразно подбирать их производительность таким образом, чтобы обеспечивать трехсменный режим эксплуатации и высокие коэффициенты загрузки оборудования. Это позволит снизить удельное влияние платы за установленную мощность на себестоимость нагрева (термической или химико-термической обработки). При низких значениях коэффициента загрузки оборудования и работе в односменном режиме определяющее значение при выборе типа отопления будет иметь конструкция футеровки печи (так как в этом случае существенно возрастают удельные затраты на аккумуляцию кладкой и холостой ход печи).

Как показывают расчеты, применение даже идеальной электропечи, эксплуатирующейся с максимальной производительностью, по стоимостному выражению затрат на энергоресурсы эквивалентно эксплуатации газовой печи с КПД около 25 %. Что касается применения термических печей современных конструкций (высокая степень утилизации вторичных ресурсов, низкоинерционная футеровка), то при текущей конъюнктуре цен на рынках газа и электроэнергии они находятся вне конкуренции.

Следует отметить, что результаты расчетов, приведенные на рисунках 2–5, не включают в себя капитальные и эксплуатационные

расходы, учет которых может существенно изменить картину в пользу электропечей. К этому стоит добавить, что электронагрев предпочтительней с точки зрения обеспечения промышленной безопасности производства, управления технологическим процессом и является более экологичным (на рабочем месте), а также то, что электропечи требуют меньше места для подвода и отвода энергетических коммуникаций.

### Список литературы

**1. Методика** оценки эффективности использования электронагрева в промышленных теплотехнологиях / М.Л. Герман [и др.] // Энергоэффективность. – 2016. – № 2. – С. 29–34.

**2. Интернет-портал** оборудования термообработки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.by>. – Дата доступа: 10.10.20.

**3. Оптимизация** топливно-кислородных режимов сжигания углеводородного топлива в теплогенерирующих установках жилищно-коммунальных хозяйств [Электронный ресурс]: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. Ратников П.Э.; исполн.: Трусова И.А. [и др.]. – Минск, 2013. – 152 с. – Библиогр.: с. 142–149. – № ГР 20111002.

**4. Интернет-портал** оборудования термообработки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://maxaero.by>. – Дата доступа: 10.10.20.

**5. Арендарчук, А.В.** Общепромышленные электропечи периодического действия / А.В. Арендарчук, А.С. Бородачев, В.И. Филиппов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 112 с.

**6. Интернет-портал** оборудования термообработки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.gb.by](http://www.gb.by). – Дата доступа: 10.10.20.

**7. Интернет-портал** оборудования термообработки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org>. – Дата доступа: 10.10.20.

### References

**1. Metodika** ocenki effektivnosti ispol'zovaniya elektronagreva v promyshlennyh teplotekhnologiyah [Methodology for assessing the efficiency of using electric heating in industrial heat technologies] /

M.L. German [et al.] // *Energoeffektivnost' = Energy efficiency*. – 2016. – No. 2. – P. 29–34.

2. <https://minenergo.gov.by>

3. **Optimizaciya** *toplivno-kislorodnyh rezhimov szhiganiya uglevodородного топлива v teplogeneriruyushchih ustanovkah zhilishchno-kommunal'nyh hozyajstv* [Optimization of fuel-oxygen modes of combustion of hydrocarbon fuel in heat-generating installations of housing and communal services]: Research report (final) / BNTU; supervisor Ratnikov P.E., executor Trusova I.A. [et al.]. – Minsk, 2013. – 152 p.

4. <https://maxaero.by>

5. **Arendarchuk, A.V.** *Obshchepromyshlennye pechi periodicheskogo dejstviya* [General industrial batch furnaces] / A.V. Arendarchuk, A.S. Borodachev, V.I. Fillipov. – Moscow: Energoizdat Publ., 1990. – 112 p.

6. [www.gb.by](http://www.gb.by)

7. <https://ru.wikipedia.org>

*Поступила 25.10.2021*

*Received 25.10.2021*