

**МЕТОДИКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ
ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ
МОДЕРНИЗАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ТОПЛИВНЫХ
НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ**

П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук, **И.А. ТРУСОВА**, д-р техн. наук,
Н.Г. МАЛЬКЕВИЧ, канд. техн. наук
Белорусский национальный технический университет

В работе предложены критерии оценки выбора целесообразности модернизационных мероприятий с точки зрения окупаемости проектов модернизации нагревательных топливных печей. Предложена методика оценки эффективности замены футеровки и выбора оптимальной степени рекуперации теплоты отходящих газов.

***Ключевые слова:** нагревательные топливные печи, модернизационные мероприятия, период окупаемости, футеровка, оптимальная степень рекуперации.*

**METHODOLOGY FOR THE ECONOMIC ASSESSMENT
OF THE FEASIBILITY OF MODERNIZATION MEASURES
FOR FUEL HEATING AND THERMAL FURNACES**

P.E. RATNIKOV, Ph. D in Technical Sciences, **I.A. TRUSOVA**, Dr. of Engineering Sciences, **N.G. MALKEVICH**, Ph. D in Technical Sciences
Belarusian National Technical University

The paper proposes criteria for assessing the choice of the feasibility of modernization measures from the point of view of the payback of projects for the modernization of heating fuel furnaces. A technique for choosing the optimal degree of heat recovery from waste gases is proposed.

***Keywords:** heating fuel furnaces, modernization measures, payback period, lining, optimal recovery rate.*

Введение. Анализ путей повышения энергоэффективности топливных нагревательных и термических (химико-термических) печей позволил разделить факторы, снижающие топливopотребление, на

три группы [1]: теплотехнические или конструкционные, технологические и организационные.

К теплотехническим факторам относят:

- оборудование печей устройствами утилизации вторичных энергетических ресурсов (ВЭР);
- применение современных футеровочных материалов;
- применение современных средств автоматизации работы и управления печью (АСУ) и ее отдельными элементами (горелочными устройствами и т. д.).

Технологические факторы включают:

- повышение начального теплосодержания металла перед тепловой обработкой;
- разработка рациональных тепловых режимов;
- применение резервного топлива (энергии).

Организационные факторы (факторы управления) включают:

- оптимизацию загрузки оборудования;
- снижение времени простоя оборудования и работы на холостом ходу и т. д.;
- внедрение систем автоматизированного управления технологическими процессами;
- перевод на альтернативное топливо (в зависимости от экономической целесообразности).

Также следует учитывать, что тепловая работа термических и химико-термических печей зависит от их теплотехнологических режимов, которые определяются необходимыми структурными и физико-химическими превращениями в обрабатываемом материале.

Затраты на функционирование печи после реконструкции включают капитальные затраты на оборудование и материалы (затраты на демонтаж старого оборудования и монтаж нового), затраты на потребляемое топливо и затраты на обслуживание (эксплуатацию) печи за весь период эксплуатации

$$3^P = 3_{00}^P + 3_9^P + 3_T^P, \quad (1)$$

или

$$3^P = 3_{00}^P + 3_9^P T_3 + T_3(C_T B + C_3 W + 12C_{y,m} Nk_3), \quad (2)$$

где $Z_{об}^p$ – затраты по покупке и монтаж оборудования, узлов и агрегатов, руб; Z_3^p – затраты на обслуживание (эксплуатацию), руб; Z_T^p – затраты на топливо и энергию; Z_3^p – затраты на обслуживание, руб/год; T_3 – период эксплуатации, лет; C_T – стоимость топлива, руб/м³ (руб/кг); C_3 – стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч; $C_{y.m}$ – плата за установленную мощность, руб/(кВт·ч·мес); B , – расход топлива за период эксплуатации печи, м³/год (кг/год); W – расход электроэнергии кВт·ч/год; N – мощность, потребляемая печью, кВт; k_3 – отношение заявленной мощности к установленной.

Капитальные затраты и стоимость обслуживания оборудования можно оценить, обладая информацией о конкретной конструкции печи, характеристиках его основных агрегатов, применяемых материалов. Экономия топливно-энергетических ресурсов при модернизации (или разницу в расходах топлива между различными предлагаемыми мероприятиями) можно оценить исходя из расчетов тепловых балансов оборудования до и после реконструкции.

При расчетах экономии энергоресурсов и эксплуатационных затрат после модернизации, определяемых формулой

$$\Delta Z^p = \Delta Z_3^p + (C_T \Delta B + C_3 W + 12 C_{y.m} \Delta N k_3), \quad (3)$$

следует оценить период возврата инвестиций и рентабельность реконструктивных мероприятий, по выражению

$$T_{в.и} = \frac{И}{Д + А} = \frac{Z_{об}^p}{\Delta Z_3^p + (C_T \Delta B + C_3 W + 12 C_{y.m} \Delta N k_3) + А}; \quad (4)$$

$$А = \frac{1}{T_3} Z_{об}^p; P = \frac{100\%}{T_{в.и}},$$

где $И$ – инвестиционные затраты в реконструкцию, руб; $Д$ – доход от реконструкции, руб/год; $А$ – величина амортизационных отчислений, руб/год; P – рентабельность инвестиций, %/год.

Рентабельность производства должна быть больше процентной ставки рефинансирования, установленной банком

$$P > B_{\text{ст.р}},$$

где $B_{\text{ст.р}}$ – процентная ставка рефинансирования, %.

Формула (4) справедлива, если в качестве инвестиций используются собственные средства. Если были привлечены финансовые ресурсы банков, то в этом случае рассматриваем динамический срок окупаемости. Как правило, динамический доход рассчитывается по промежуткам времени и в начальный период реализации проекта является отрицательным, выходя в положительную область с течением времени и получением доходов от производства (рисунок 1).

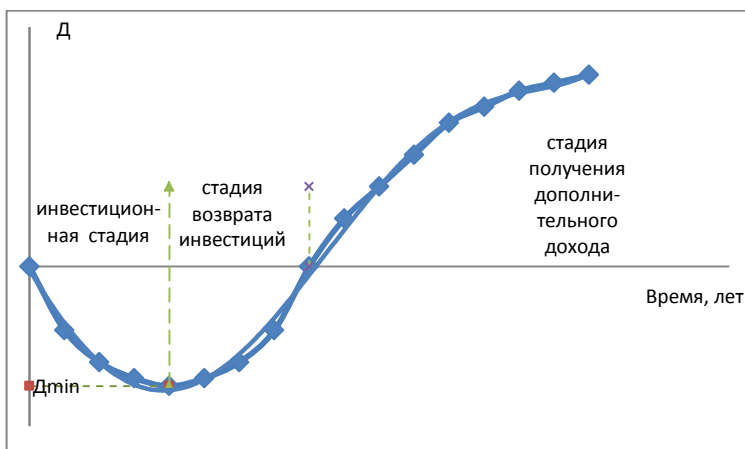


Рисунок 1 – Стадии дохода предприятия в результате реконструкции

Для определения динамического периода окупаемости (возврата инвестиций) формула (4) принимает вид

$$T_{\text{в.и}} = \frac{И}{D + A} = \frac{И}{\sum_{i=1}^K \left(D_i - \frac{И}{K} - \left(И - \frac{И(i-1)}{K} \right) B \right) + A}; \quad (5)$$

$$И = 3_{\text{об}}^P; D_i = \Delta 3_3^P + (C_T \Delta B + C_3 W + 12 C_{y.m} \Delta N k_3),$$

где B – ставка банковского процента, %; K – период, на который взят кредит, лет.

При оценочных расчетах проектов реконструкции допускается применять упрощенную формулу расчета для оценки динамического срока окупаемости исходя из равенства инвестиционных затрат разности суммарного дохода и суммы процентных выплат банку за то же время

$$T_{в.и} = \frac{Z_{об}^p}{\Delta z_3^p + (C_T \Delta B + C_3 W + 12 C_{y.м} \Delta N k_3) + A - 0,5B \cdot Z_{об}^p}. \quad (6)$$

Это основной показатель для принятия решения о модернизации, так как зачастую, несмотря на достаточно короткий простой срок окупаемости, высокие ставки по банковским кредитам настолько удлиняют срок окупаемости проекта, что вообще переводят проект в разряд некупаемых (убыточных).

Расход топлива определяется из теплового баланса и составляет:
– при работе в стационарных условиях

$$B_{ст} = \frac{Q_{мет} + Q_{кл} + Q_{изл} + Q_{охл.ср} + Q_{ок} + Q_{тр} + Q_{н.пот} + Q_{з.атм} - Q_{эжз}}{Q_p^H + L_B^D (i_B - i_B^0) - V_{д.г} i_{д.г} - V_{подс} i_B^{t_{д.г}} - (0,126CO + 0,108H_2) - Q_p^H R}; \quad (7)$$

– при работе в нестационарных условиях

$$B_{н.ст} = \frac{Q_{мет} + Q_{кл} + Q_{изл} + Q_{охл.ср} + Q_{ок} + Q_{тр} + Q_{н.пот} + Q_{акк} + Q_{з.атм} - Q_{эжз}}{Q_p^H + L_B^D (i_B - i_B^0) - V_{д.г} i_{д.г} - V_{подс} i_B^{t_{д.г}} - (0,126CO + 0,108H_2) - Q_p^H R}, \quad (8)$$

где $Q_{мет}$ – теплота, затраченная на нагрев металла, МВт (МДж/цикл); $Q_{эжз}$ – теплота, выделившаяся при окислении металла (теплота экзотермических реакций), МВт (МДж/цикл); $Q_{ок}$ – тепловые потери с окалиной, МВт (МДж/цикл); Q_p^H – низшая рабочая

теплота сгорания 1 м^3 газообразного топлива, МДж/м³; L_B^D – действительное количество воздуха для сжигания газообразного топлива, м³/м³; $V_{д.г}$ – объем уходящих дымовых газов, м³/м³; $i_{д.г}$ – энтальпия уходящих дымовых газов, МДж/м³; i_B – энтальпия подогретого воздуха, МДж/м³; i_B^0 – начальная энтальпия воздуха, МДж/м³;

$Q_{\text{кл}}$ – тепловые потери через кладку, МВт (МДж/цикл); $Q_{\text{изл}}$ – тепловые потери через открытые окна и проемы, МВт (МДж/цикл); $Q_{\text{охл.ср}}$ – тепловые потери с охлаждающей средой, МВт (МДж/цикл); $Q_{\text{тр}}$ – тепловые потери, связанные с нагревом перемещающихся частей печи и транспортирующих устройств, МВт (МДж/цикл); $Q_{\text{н.пот}}$ – неучтенные тепловые потери, МВт (МДж/цикл); CO , H_2 – содержание CO и H_2 в дымовых газах, %; R – доля механического недожога, (%/100); $V_{\text{подс}}$ – количество холодного воздуха, подсаваемого в печь, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $i_{\text{в}}^{\text{ДГ}}$ – энтальпия воздуха (подсосы), нагретого до температуры дымовых газов, °С; $Q_{\text{акк}}$ – теплота, аккумулированная кладкой (МДж/цикл); $Q_{\text{з.атм}}$ – теплота, затраченная на нагрев защитной атмосферы (эндогаза).

Расход топлива в год будет составлять:

– для печей непрерывного действия

$$\Sigma B = B_{\text{ст}}\tau + N_{\text{раз}}B; \quad (9)$$

– для печей периодического действия

$$\Sigma B = N_{\text{раз}}B_{\text{н_ст1}} + N_{\text{техн}}B_{\text{н_ст2}}, \quad (10)$$

где τ – время работы печи в стационарном режиме, с/год; $N_{\text{раз}}$ – количество разогревов печи до рабочей температуры после простоев в год (зависит от производственной программы и сменности работы оборудования), цикл/год; $N_{\text{техн}}$ – количество технологических циклов работы печи, цикл/год.

Наиболее распространенными вариантами реконструкций топливных печей являются установка (модернизация) теплоутилизирующих устройств и замена футеровочных материалов. Ниже рассмотрим влияние данных вариантов реконструкции печей на сокращение топливopotребления.

Реконструкция футеровки. При рассмотрении вариантов реконструкции ограждающих конструкций печей необходимо учитывать технологические процессы, протекающие в рабочей зоне. Так, например, при работе нагревательных и термических печей основным критерием выбора футеровки является минимизация тепловых потерь через футеровку и на аккумуляцию кладкой. Для печей химико-термической обработки необходимо обращать вни-

вание на возможность взаимодействия печной среды с материалами футеровки. Кроме того футеровка термических печей испытывает знакопеременные температурные нагрузки (периоды нагрева и охлаждения) и к ней предъявляются соответствующие требования по прочности на разрыв и изгиб, трещиностойкости, термостойкости.

Футеровка термических печей, работающих по методическому режиму, находится в квазистационарном состоянии и аккумуляцией теплоты при работе данных печей в трехсменном режиме можно пренебречь. Реконструкция футеровок должна проводиться только с целью соблюдения требований охраны труда. Что касается работы печей периодического действия (или проходных печей, работающих по одно- и двухсменному режиму), то процесс тепловой обработки характеризуется значительной аккумуляцией теплоты кладки, которая зависит от массы (плотности) футеровки и ее теплоемкости.

Оптимальный вариант выбора футеровки печей может быть определен исходя из минимума суммы капитальных и эксплуатационных затрат, а также стоимости энергоресурсов, затраченных на аккумуляцию кладкой, и тепловые потери через футеровку за период эксплуатации печи между капитальными ремонтами

$$Z_{\phi} \rightarrow \min,$$

$$Z_{\phi} = Z_{\phi_к} + Z_{\phi_э} + Z_{\phi_т}, \quad (11)$$

$$Z_{\phi} = n_1 C_{\phi} F_{\phi} + n_2 C_a F'_{\phi} T_э + C_{т} \left(\frac{N_{раз} Q_{акк1} + N_{техн} Q_{акк2} + Q_{тепл}}{Q_{н}^p - Q_{физ}} \right) T_э,$$

где C_{ϕ} – стоимость 1 м² футеровки с учетом монтажа, руб/м²; F_{ϕ} – площадь футеровки м²; F'_{ϕ} – площадь футеровки, которую заменяют при плановом ремонте, м²; n_1 – количество капитальных ремонтов футеровки за период эксплуатации печи, шт.; n_2 – количество замен огнеупорного слоя футеровки в год, шт./год; $T_э$ – период эксплуатации печи, лет; $Q_{акк1}$ – теплота аккумулированная кладкой при разогреве печи до рабочей температуры после простоя (при работе печи в стационарном или при трехсменном режиме $Q_{акк1} = 0$),

МДж/цикл; $Q_{\text{акк2}}$ – теплота, аккумулированная кладкой при разогреве печи за технологический цикл, МДж/цикл; $Q_{\text{тепл}}$ – тепловые потери теплопроводностью через кладку, МДж/год; $Q_{\text{физ}}$ – физическая теплота, вносимая в печь с подогретым воздухом ($Q_{\text{физ}} = (i_{\text{в}} - i_{\text{в}}^0)$), МДж/цикл.

Энергия на разогрев футеровки существенно зависит от удельной теплоемкости и плотности футеровки, а также от технологических условий функционирования печи (время и степень охлаждения футеровки).

Г.Г. Немзер в работе [2] показал, что применение в качестве футеровочных материалов волокнистых огнеупоров в нагревательных и термических печах периодического действия позволяет снизить топливопотребление до 25 %, повысить производительность на 10–15 % (снижается длительность цикла термообработки за счет более высокой скорости разогрева печи). Преимущества использования волокнистой футеровки заключаются в следующем:

- существенное снижение топливопотребления;
- снижение массы футеровки печи (в 10 и более раз), а также массы металлоконструкций;
- увеличение производительности за счет снижения времени выхода печи на заданный температурный режим;
- значительное увеличение числа теплосмен (до 2000 и более);
- облегчение трудоемкости монтажа футеровки и сокращение сроков монтажа в 3–5 раз;
- малые наружные габариты печи, что особо важно в машиностроительных цехах;
- возможность лучшей герметизации рабочего пространства и снижения подсосов в печь;
- высокие эксплуатационные свойства (хорошая эластичность, малая кажущаяся плотность и низкая теплопроводность, термостойкость, трещиностойкость, значительная прочностью на разрыв и на изгиб).

При работе в нестационарных условиях отношение аккумуляции теплоты в печи после реконструкции и до будут равны

$$\frac{Q_{\text{акк_пр}}}{Q_{\text{акк_б}}} = \frac{\sum_j^n c_j \rho_j \delta_j F_{\text{фj}} \left(t_j^{\text{кон}} - t_j^{\text{нач}} \right)}{\sum_i^m c_i \rho_i \delta_i F_{\text{фи}} \left(t_i^{\text{кон}} - t_i^{\text{нач}} \right)} = \frac{\sum_j^n F_{\text{фj}} \left(t_j^{\text{кон}} - t_j^{\text{нач}} \right) \sqrt{\lambda_j c_j \rho_j \tau_{\text{п_пр}}}}{\sum_i^m F_{\text{фи}} \left(t_i^{\text{кон}} - t_i^{\text{нач}} \right) \sqrt{\lambda_i c_i \rho_i \tau_{\text{п_б}}}}. \quad (12)$$

Время и скорость выхода на стационарный режим работы с холодного состояния для однослойной футеровки толщиной δ при постоянном тепловом потоке q можно оценить по формуле

$$\Delta\tau = \frac{\rho \delta c \left(t^{\text{кон}} - t^{\text{нач}} \right)}{q} = \frac{\rho \delta c \Delta t}{q}; \quad V = \frac{\Delta t}{\Delta\tau} = \frac{q}{\rho \delta c}.$$

Отношение скоростей выхода на стационарный режим при замене футеровки будет равно

$$\frac{V_{\text{пр}}}{V_{\text{б}}} = \frac{\rho_{\text{б}} \delta_{\text{б}} c_{\text{б}}}{\rho_{\text{пр}} \delta_{\text{пр}} c_{\text{пр}}} = \frac{\tau_{\text{б}}}{\tau_{\text{пр}}}, \quad (13)$$

откуда видно, что чем меньше удельная плотность и теплоемкость футеровки, тем быстрее она выходит на стационарный режим.

Таким образом, критерием замены существующей футеровки является выполнение следующего условия

$$T_{\text{в.и}} \leq K T_{\text{э}}; \quad T_{\text{в.и}} = \frac{И}{D + A} = \frac{И}{\sum_{i=1}^K \left(D_i - \frac{И}{K} - \left(И - \frac{И(i-1)}{K} \right) B \right) + A};$$

$$И = 3_{\text{ф_к}}^{\text{нов}} + 3_{\text{ф_з}}^{\text{нов}} + 3_{\text{ф_т}}^{\text{нов}}; \quad (14)$$

$$D = (3_{\text{ф_э}}^{\text{ст}} + 3_{\text{ф_т}}^{\text{ст}}) - 3_{\text{ф_к}}^{\text{нов}} + 3_{\text{ф_з}}^{\text{нов}} + 3_{\text{ф_т}}^{\text{нов}},$$

где K – доля периода окупаемости в периоде эксплуатации печи, %.

Установка систем рекуперации теплоты. Выполним оценку эффективности реализации данных мероприятий.

При установке на печь рекуператора необходимо минимизировать расходы, которые складываются из капитальных затрат на

приобретение рекуператора и вспомогательных устройств (вентиляторы и дымососы), затрат на эксплуатацию рекуператора и стоимости отопления печи

$$Z_{\text{рек}} \rightarrow \min;$$

$$Z_{\text{рек}} = Z_{\text{рек}_к} + Z_{\text{рек}_э} + Z_{\text{рек}_т}; \quad (15)$$

$$Z_{\text{рек}_к} = (\alpha_p + \alpha_d + \alpha_b)F,$$

где $Z_{\text{рек}_э} = (C_э(M_b + M_d)\tau + 12C_{у.м}(M_b + M_d)k_3 + \alpha_{п})FT_э$; $Z_{\text{рек}_т} = C_t B_t$.
Здесь α_p – удельная стоимость рекуператора (с учетом монтажа), руб/м²; α_d – удельная стоимость дымососа (с учетом монтажа), руб/м²; α_b – удельная стоимость вентиляторов (с учетом монтажа), руб/м²; F – площадь рабочей поверхности рекуператора, м²; M_b – удельная мощность вентилятора, кВт/м²; M_d – мощность дымососа, кВт/м²; $\alpha_{п}$ – средняя годовая заработная плата персонала, обслуживающего рекуператор (равна 0, если обязанности по обслуживанию возложены на штатные бригады работников), руб/год; τ – время работы оборудования, с; B_t – потребление топлива печью при использовании рекуператора, руб/м³ (руб/кг).

Выражение (15) можно представить в виде

$$Z_{\text{рек}} = (\alpha_p + \alpha_d + \alpha_b)F + (C_э(M_b + M_d)\tau + 12C_{у.м}(M_b + M_d)k_3 + \alpha_{п})FT_э - C_t \Delta B_t. \quad (16)$$

или

$$Z_{\text{рек}} = (\alpha_p + \alpha_d + \alpha_b)F + (C_э(M_b + M_d)\tau + 12C_{у.м}(M_b + M_d)k_3 + \alpha_{п})FT_э - C_t B_0 \text{Э}.$$

где ΔB_t – экономия топлива от установки рекуператора, руб/год; Э – экономия топлива от эксплуатации рекуператора.

Отсюда можно определить период возврата инвестиций при установке рекуператора за счет кредитных средств (на K лет)

$$T_{в.и} = \frac{И}{Д + А} = \frac{И}{\sum_{i=1}^K \left(D_i - \frac{И}{K} - \left(И - \frac{И(i-1)}{K} \right) Б \right) + А};$$

$$И = (\alpha_p + \alpha_d + \alpha_b)F + (C_3(M_b + M_d)\tau + 12C_{y.m}(M_b + M_d)k_3 + \alpha_n)FT_3; \quad (17)$$

$$Д = C_T B_T Э.$$

Экономия топлива определяется степенью рекуперации теплоты отходящих дымовых газов рекуператором, который также влияет и на его стоимость. Степень рекуперации теплоты можно определить по выражению:

для печей непрерывного действия

$$K_{рек} = \frac{L_B^D (i_B - i_B^0)}{V_{д.г} i_{д.г}}; \quad (18)$$

для печей периодического действия

$$K_{рек} = \frac{L_B^D (i_B - i_B^0)}{0,5V_{д.г} (i_{д.г}^H + i_{д.г}^K)}$$

или

$$K_{рек} = \frac{L_B^D (i_B - i_B^0)}{V_{д.г} \frac{(i_{д.г}^H + i_{д.г}^K)}{\ln(i_{д.г}^H / i_{д.г}^K)}},$$

где $i_{д.г}^H$ и $i_{д.г}^K$ – соответствующие энтальпии в начале и в конце работы печи.

Экономия топлива будет составлять [3]

$$Э = \frac{K_{рек} i_{д.г}}{i_{хим} - i_{д.г} (1 - K_{рек})} = \frac{K_{рек} i_{д.г}}{Q_H^P / V_{д.г} - i_{д.г} (1 - K_{рек})}. \quad (19)$$

Или с учетом (18) формула (19) приобретает вид

$$\Theta = \frac{\frac{L_B^D}{V_{дг}} c_B t_B}{\frac{Q_H^p}{V_{дг}} - \left(c_{дг} t_{дг} - \frac{L_B^D}{V_{дг}} c_B t_B \right)}, \quad (20)$$

где c_B – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(м³·°C); $c_{дг}$ – удельная теплоемкость дымовых газов, Дж/(м³·°C).

Зависимости энтальпий воздуха и продуктов сгорания от их температуры с коэффициентом корреляции 0,99 можно представить в виде [4]

$$i_B = 0,0014 t_B.$$

Прирост экономии топлива от степени рекуперации будет равен

$$\frac{\partial \Theta}{\partial K_{рек}} = \frac{i_{дг}}{Q_H^p / V_{дг} - i_{дг} + i_{дг} K_{рек}} - \frac{K_{рек} i_{дг}^2}{(Q_H^p / V_{дг} - i_{дг} + i_{дг} K_{рек})^2}. \quad (21)$$

На рисунке 2 представлены зависимости экономии топлива от коэффициента рекуперации теплоты, а также зависимости прироста экономии топлива от степени рекуперации при различной температуре отходящих газов. В качестве исходных данных принимали следующие: топливо – природный газ с теплотой сгорания 34,2 МДж/м³; $V_{дг} = 10,5$ м³/м³; $L_B^D = 9,5$ м³/м³.

Найдем зависимость рабочей площади рекуператора от степени рекуперации теплоты. Площадь поверхности нагрева рекуператора определяется из выражения

$$F = \frac{B \eta_B L_B^D (i_B - i_B^0)}{K_{пер} \theta_{ср}}, \quad (22)$$

где η_v – коэффициент, учитывающий потери воздуха в рекуператоре; θ – температурный напор, зависящий от выбранной схемы теплообмена, °C; $K_{пер}$ – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C).

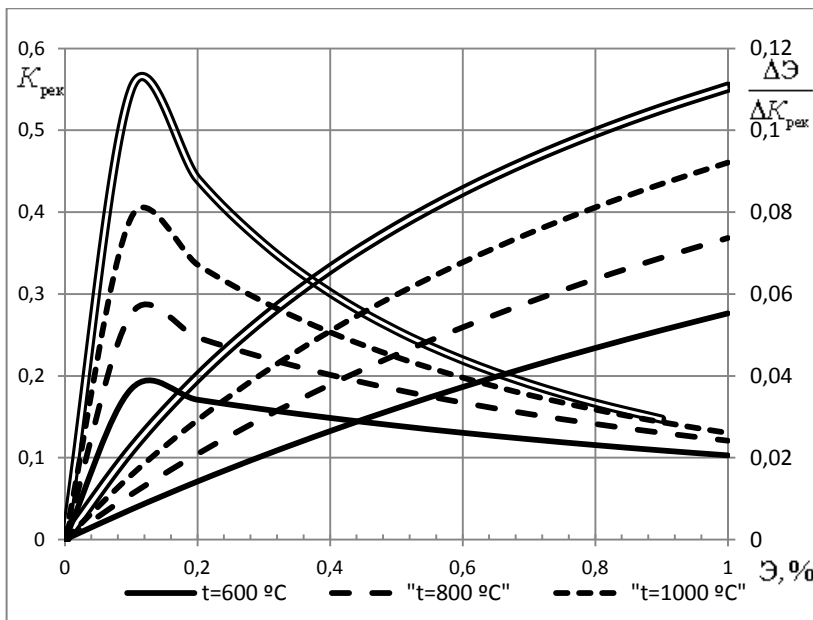


Рисунок 2 – Значения экономии топлива при различных коэффициентах рекуперации и температуре отходящих газов

С учетом формулы (18) выражение (22) будет иметь вид

$$F = \frac{B\eta_v K_{рек} V_{д.г} i_{д.г}}{K_{пер} \theta_{ср}}. \tag{23}$$

Расход топлива B определяется при решении теплового баланса (формулы (7) и (8)). Температурный напор можно определить из работы [4]

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln(\theta_1/\theta_2)},$$

при прямотоке

$$\theta_1 = t_{\text{д}}^{\text{ВХ}} - t_{\text{в}}^{\text{ВХ}};$$

$$\theta_2 = t_{\text{д}}^{\text{ВЫХ}} - t_{\text{в}}^{\text{ВЫХ}};$$

при противотоке

$$\theta_1 = t_{\text{д}}^{\text{ВХ}} - t_{\text{в}}^{\text{ВЫХ}};$$

$$\theta_2 = t_{\text{д}}^{\text{ВЫХ}} - t_{\text{в}}^{\text{ВХ}}.$$

Коэффициент теплопередачи для плоских и цилиндрических стенок можно определить по формулам

$$K_{\text{пер_пл}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{д.г}}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}};$$

$$K_{\text{пер_цил}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{д.г}} d_{\text{нар}}} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}} d_{\text{вн}}}},$$

где $\alpha_{\text{д.г}}$ – коэффициент теплоотдачи для дымовых газов стенкам рекуператора, Вт/(м²·°С); δ – толщина стенок рекуператора, м; $d_{\text{нар}}$ и $d_{\text{вн}}$ – соответственно наружный и внутренний диаметры труб рекуператора, м; $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи от рекуператора к воздуху, Вт/(м²·К).

Если пренебречь формой элементов поверхности теплообмена и его термическим сопротивлением, то коэффициент теплопередачи можно определить по формуле

$$K_{\text{пер}} = \frac{\alpha_{\text{д.г}} \alpha_{\text{в}}}{\alpha_{\text{д.г}} + \alpha_{\text{в}}}.$$

Коэффициент теплоотдачи для дымовых газов складывается из радиационной и конвективной составляющих $\alpha_{\text{д.г.}} = \alpha_{\text{д.г.р}} + \alpha_{\text{д.г.к}}$, для воздуха радиационной составляющей можно пренебречь, так как воздух состоит из двухатомных молекул и считается лучепрозрачным.

Коэффициент теплоотдачи излучением находится из выражения

$$\alpha_{\text{д.г.р}} = C_{\text{пр}} \frac{[(t_{\text{д.г.}}/100)^4 - (\bar{t}_{\text{ст.}}/100)^4]}{t_{\text{д.г.}} - \bar{t}_{\text{ст.}}}$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяется исходя из условий протекания дымовых газов (воздуха) в рекуператоре (методика расчета подробно представлена в работе [5]).

На рисунке 3 представлена зависимость рабочей площади поверхности радиационно-конвективного рекуператора топлива от коэффициента рекуперации теплоты при различной температуре дымовых газов (на входе в рекуператор). В качестве исходных данных принимали следующие: топливо – природный газ с теплотой сгорания 34,2 МДж/м³; $V_{\text{д.г.}}$ – 10,5 м³/м³; $L_{\text{в}}^{\text{д}}$ – 9,5 м³/м³; расход природного газа – 0,1 м³/с.

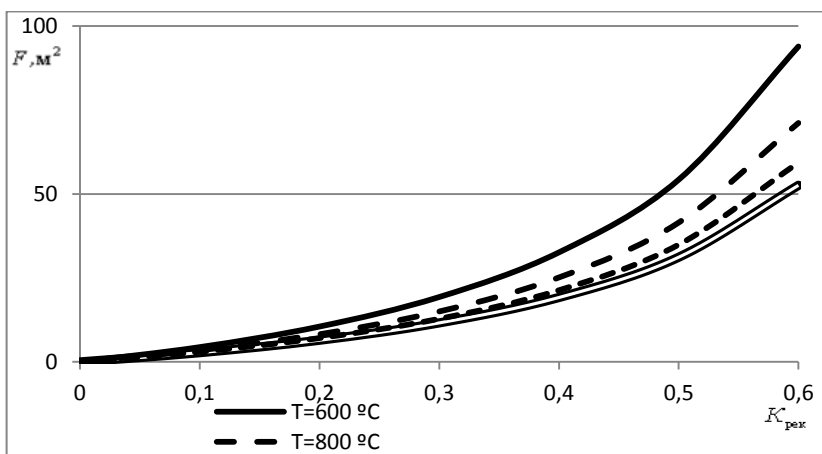


Рисунок 3 – Зависимость рабочей площади поверхности радиационно-конвективного рекуператора от коэффициента рекуперации теплоты при различной температуре дымовых газов

Как видно из рисунка, с увеличением коэффициента рекуперации площадь поверхности рекуператора существенно увеличивает-

ся, и, соответственно, возрастают капитальные и эксплуатационные издержки. Расход топлива прямо пропорционально влияет на площадь поверхности.

Рациональную степень рекуперации теплоты можно определить исходя из равенства прироста экономии топлива и прироста приведенных затрат на рекуператор. Для этого необходимо решить уравнение

$$C_{\tau} T_{\varepsilon} \left(B_0 \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial K_{\text{рек}}} \right) = C_{\text{рек}} \frac{\partial F}{\partial K_{\text{рек}}}, \quad (24)$$

где $C_{\text{рек}} = Z_{\text{рек}_k} + Z_{\text{рек}_\varepsilon}$; T_{ε} – рассматриваемый период времени эксплуатации печи, с.

Прирост затрат на рекуператор от степени рекуперации будет равен

$$\frac{\partial F}{\partial K_{\text{рек}}} = \frac{B \eta_{\text{в}} V_{\text{д.г}} i_{\text{д.г}}}{K_{\text{пер}} \theta_{\text{ср}}}. \quad (25)$$

Подставив уравнения (25) и (21) в (24), получим

$$\begin{aligned} C_{\tau} T_{\varepsilon} B_0 &= \left(\frac{i_{\text{д.г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}/V_{\text{д.г}} - i_{\text{д.г}} + i_{\text{д.г}} K_{\text{рек}}} - \frac{K_{\text{рек}} i_{\text{д.г}}^2}{(Q_{\text{н}}^{\text{п}}/V_{\text{д.г}} - i_{\text{д.г}} + i_{\text{д.г}} K_{\text{рек}})^2} \right) = \\ &= C_{\text{рек}} \frac{B \eta_{\text{в}} V_{\text{д.г}} i_{\text{д.г}}}{K_{\text{рек}} \theta_{\text{ср}}}. \end{aligned} \quad (26)$$

Разделим на B_0

$$\begin{aligned} C_{\tau} T_{\varepsilon} &\left(\frac{i_{\text{д.г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}/V_{\text{д.г}} - i_{\text{д.г}} + i_{\text{д.г}} K_{\text{рек}}} - \frac{K_{\text{рек}} i_{\text{д.г}}^2}{(Q_{\text{н}}^{\text{п}}/V_{\text{д.г}} - i_{\text{д.г}} + i_{\text{д.г}} K_{\text{рек}})^2} \right) = \\ &= C_{\text{рек}} \frac{B}{B_0} \frac{\eta_{\text{в}} V_{\text{д.г}} i_{\text{д.г}}}{K_{\text{рек}} \theta_{\text{ср}}}. \end{aligned} \quad (27)$$

Учтем, что

$$\frac{B}{B_0} = 1 - \Xi = 1 - \frac{K_{\text{рек}} i_{\text{д.г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} / V_{\text{д.г}} - i_{\text{д.г}} (1 - K_{\text{рек}})} = 1 - \frac{K_{\text{рек}} i_{\text{д.г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} / V_{\text{д.г}} - i_{\text{д.г}} + i_{\text{д.г}} K_{\text{рек}}}.$$

Тогда запишем

$$C_{\text{т}} T_{\text{э}} \left(\frac{i_{\text{д.г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} / V_{\text{д.г}} - i_{\text{д.г}} + i_{\text{д.г}} K_{\text{рек}}} \right) - \frac{K_{\text{рек}} i_{\text{д.г}}^2}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} / V_{\text{д.г}} - i_{\text{д.г}} + i_{\text{д.г}} K_{\text{рек}}} - C_{\text{рек}} \left(1 - \frac{K_{\text{рек}} i_{\text{д.г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} / V_{\text{д.г}} - i_{\text{д.г}} + i_{\text{д.г}} K_{\text{рек}}} \right) \frac{\eta_{\text{в}} V_{\text{д.г}} i_{\text{д.г}}}{K_{\text{пер}} \theta_{\text{пер}}} = 0.$$

Решением данного уравнения будет

$$K_{\text{рек}} = \frac{i_{\text{д.г}} \left(\frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{V_{\text{д.г}}} - i_{\text{д.г}} \right) - \frac{C_{\text{рек}}}{C_{\text{т}} T_{\text{э}}} \frac{\eta_{\text{в}} V_{\text{д.г}} i_{\text{д.г}}}{K_{\text{пер}} \theta_{\text{сп}}} \left(\frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{V_{\text{д.г}}} - i_{\text{д.г}} \right)^2}{\frac{C_{\text{рек}}}{C_{\text{т}} T_{\text{э}}} \frac{\eta_{\text{в}} V_{\text{д.г}} i_{\text{д.г}}}{K_{\text{пер}} \theta_{\text{сп}}} \left(\frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{V_{\text{д.г}}} - i_{\text{д.г}} \right) i_{\text{д.г}}}$$

или

$$K_{\text{рек}} = \frac{C_{\text{т}} T_{\text{э}} K_{\text{пер}} \theta_{\text{сп}}}{C_{\text{рек}} \eta_{\text{в}} V_{\text{д.г}} i_{\text{д.г}}} - \frac{(Q_{\text{н}}^{\text{р}} / V_{\text{д.г}} - i_{\text{д.г}})}{i_{\text{д.г}}}. \quad (28)$$

Разработанная методика (формула (28)) может использоваться для выбора оптимальной степени рекуперации теплоты отходящих газов. Для расчетов необходимо задаться видом технологического процесса в печи, температурой и составом отходящих газов, типом рекуператора и теплообменной схемы его исполнения, приведенной стоимостью единицы площади рекуператора, видом топлива и его стоимостью.

Алгоритм выбора оптимальной конструкции рекуператора представлен ниже.

1. Необходимо определиться со следующими исходными данными, характеризующими процессы сжигания топлива:

- тип процесса тепловой обработки (нагрев, термообработка, химико-термическая обработка);
- производительность печи;
- температурный уровень продуктов сгорания, покидающих печное пространство;
- используемое топливо (теплотворная способность, действительный объем воздуха горения и продуктов сгорания, состав дымовых газов, наличие подсосов воздуха и т. д.);
- стоимость топлива.

2. Выбрать конструкцию рекуператора:

- определиться с типом рекуператора;
- определиться с материалом изготовления рекуператора (найти стойкость материала к данным продуктам сгорания и количество замен за период эксплуатации печи);
- оценить удельные затраты 1 м^2 рекуператора данной конструкции, затраты на монтаж и обслуживание (с учетом количества замен).

3. По уравнению (28) определить оптимальную степень рекуперации теплоты.

4. По формулам (7) и/или (8) рассчитать тепловой баланс печи и определить расход топлива.

5. По формуле (23) вычислить рабочую поверхность рекуператора и исходя из используемых конструктивных элементов, рассчитать конструкцию рекуператора.

Заключение. Приведены критерии оценки выбора целесообразности модернизационных мероприятий с точки зрения окупаемости проектов по совершенствованию и модернизации промышленных печей. Проанализированы основные реконструктивные мероприятия, повышающие эффективность работы топливных (экономия топлива) и электрических термических (химико-термических) печей. Предложена методика выбора оптимальной степени рекуперации теплоты отходящих газов для топливных термических и химико-термических печей, позволяющая минимизировать издержки на топливо и на конструкцию и обслуживание рекуператора, а также дана оценка эффективности мероприятий по реконструкции футеровки.

Список литературы

1. Тимошпольский, В.И. Концепция реконструкции и модернизации парка нагревательных печей металлургических и машиностроительных предприятий Республики Беларусь: от теории к практике (проблемные вопросы) / В.И. Тимошпольский, М.Л. Герман // *Литье и металлургия*. – 2007. – № 2. – С. 21–28.

2. Немзер, Г.Г. Теплотехнология кузнечно-прессового производства / Г.Г. Немзер. – Л.: Машиностроение, 1988. – 320 с.

3. Корнеев, С.В. Анализ эффективности систем рекуперации нагревательных печей / С.В. Корнеев, Д.В. Менделев // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2009. – Вып. 32. – С. 40–49.

4. Менделев, Д.В. Теплотехническое обоснование энергоэффективных технологий и конструкций промышленных печей для нагрева металла: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Д.В. Менделев; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2012. – 21 с.

5. Тимошпольский, В.И. Промышленные теплотехнологии: методики и инженерные расчеты оборудования высокотемпературных теплотехнологий машиностроительного и металлургического производства / В.И. Тимошпольский, А.П. Несенчук, И.А. Трусова. – Минск: Вышэйшая школа, 1998. – 422 с.

6. Сорока, Б.С. Системы сжигания и теплоутилизационные устройства технологических печей: современное состояние и мировые тенденции / Б.С. Сорока // *Энерготехнология и ресурсосбережение*. – 2012. – № 2. – С. 54–68.

References

1. Timoshpol'skij, V.I. *Koncepciya rekonstrukcii i modernizacii parka nagrevatel'nyh pechej metallurgicheskikh i mashinostroitel'nyh predpriyatij Respubliki Belarus': ot teorii k praktike (problemnye voprosy)* [The concept of reconstruction and modernization of the heating furnace park of metallurgical and machine-building enterprises of the Republic of Belarus: from theory to practice (problematic issues)] / V.I. Timoshpol'skij, M.L. German // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2007. – No. 2. – P. 21–28.

2. Nemzer, G.G. *Teplotekhnologiya kuznechno-pressovogo proizvodstva* [Heat technology of forging and pressing production] / G.G. Nemzer. – Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1988. – 320 p.

3. Korneev, S.V. *Analiz effektivnosti sistem rekuperacii nagrevatel'nyh pechej* [Analysis of the efficiency of recuperation systems for heating furnaces] / S.V. Korneev, D.V. Mendeleev // *Metallurgiya: respublikanskij mezhdovedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers*. – Minsk: BNTU Publ., 2009. – Vyp. 32. – P. 40–49.

4. Mendeleev, D.V. *Teplotekhnicheskoe obosnovanie energoeffektivnyh tekhnologij i konstrukcij promyshlennyh pechej dlya nagreva metalla* [Heat engineering substantiation of energy-efficient technologies and designs of industrial furnaces for metal heating]: avtoref. dis....kand. tekhn. nauk: 05.16.02 / D.V. Mendeleev; Belarusian National Technical University, – Minsk, 2012. – 21 p.

5. Timoshpol'skij, V.I. *Promyshlennye teplotekhnologii: metodiki i inzhenernye raschety oborudovaniya vysokotemperaturnyh teplotekhnologij mashinostroitel'nogo i metallurgicheskogo proizvodstva* [Industrial heat technologies: methods and engineering calculations of equipment for high-temperature heat technologies for machine-building and metallurgical production] / V.I. Timoshpol'skij, A.P. Nesenchuk, I.A. Trusova. – Minsk: Vyshejschaya shkola Publ., 1988. – 422 p.

6. Soroka, B.S. *Sistemy szhiganiya i teploutilizacionnye ustrojstva tekhnologicheskij pechej: sovremennoe sostoyanie i mirovyje tendencii* [Combustion systems and heat recovery devices for technological furnaces: current state and global trends] / B.S. Soroka // *Energotekhnologiya i resursosberezhenie = Energy technology and resource conservation*. – 2012. – No. 2. – P. 54–68.

Поступила 25.10.2021

Received 25.10.2021