

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ МАЗУТА В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ КУЗНЕЧНОГО И ТЕРМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассматривается вопрос повышения эффективности использования мазута в нагревательных печах за счет интенсификации его горения. Решена задача технико-экономической оптимизации подогрева мазута перед его сжиганием. Разработаны метод и алгоритм определения оптимальной температуры подогрева мазута, аналитически учитывающие взаимосвязь теплотехнических, режимных параметров и дисконтированных затрат по нагревательной печи. Полученный функционал оптимизации обеспечивает достижение целесообразных теплотехнических показателей нагревательной печи при минимальных дисконтированных затратах. Результаты проведенных исследований подтверждают целесообразность использования предложенных разработок.

**Ключевые слова:** оптимизация, нагревательная печь, мазут, температура, эффективность, энергосбережение.

Повышение энергосбережения в теплотехнологических установках достигается при полном горении топлива и минимальном расходе воздуха, подаваемого в топливосжигающие устройства. При использовании мазута это обеспечивается повышением его температуры перед сжиганием. Подогрев мазута до высоких температур позволяет интенсифицировать процесс его горения за счет значительного снижения вязкости, более мелкого дробления форсунками капель мазута, значительного увеличения поверхности их испарения и уменьшения поверхностного натяжения, улучшения контакта мазута с кислородом воздуха. По данным исследователей [1–5] значительное повышение температуры подогрева мазута уменьшает диаметр его капель соплами мазутных форсунок, что ускоряет процессы испарения и горения мазута в квадратичной зависимости. В результате обеспечивается полное сгорание мазута, уменьшаются его химический и механический недожог, коэффициент избытка воздуха, потери теплоты с уходящими дымовыми газами, удельный расход мазута на тепловую обработку материала и вредные выбросы в атмосферу (оксида углерода и сажи). При этом повышаются температура в рабочем пространстве теплотехнологических установок и их удельная производительность за счет интенсификации теплообмена. Снижаются затраты на подачу воздуха в форсунки на горение мазута и на выброс дымовых газов в атмосферу, но повышаются капитальные вложения и эксплуатационные затраты на подогреватель мазута, увеличивается расход энергии на подогрев мазута. Следовательно, вопрос определения и выбора целесообразной температуры подогрева мазута перед его сжиганием представляет собой технико-экономическую задачу. Необходимым

условием при ее решении является оценка влияния температуры мазута на производительность, тепловую эффективность и экономичность работы теплотехнологических установок. Исследование данного вопроса является особенно актуальным при использовании тяжелых марок мазута.

Указанный вопрос исследовался в работах [2, 3, 6–10]. В них рассматривались методы повышения эффективности использования топлива, снижения его удельного расхода. Задача целесообразности высокотемпературного подогрева мазута решена не полно, без должного учета экономических факторов и определяющих параметров, их влияния на тепловой режим теплотехнологических установок. Существующие рекомендации для выбора значений температуры подогрева мазута перед его сжиганием основываются на допустимой его вязкости с учетом марки сжигаемого мазута, например, мазут марок М 200 и ТКМ-16 нагревают до 393 К. Таким образом, актуальным является вопрос определения и выбора оптимальной температуры подогрева мазута.

В данной работе решена задача оптимизации подогрева мазута перед его сжиганием в нагревательных печах. Оптимизация подогрева мазута заключается в выборе такой его температуры, которая бы обеспечивала минимум критерия оптимальности  $Z_f$ :

$$Z_f(B, Q_{m,с}, K) = \min, \quad (1)$$

где  $B, Q_{m,с}, K$  — расходы мазута на нагрев металла в печи, тепловой энергии на подогрев мазута, капитальные вложения в подогреватель мазута.

В качестве целевой функции приняты дисконтированные затраты на нагрев металла. Температура мазута, поступающего в форсунки, влияет

на значение переменной части себестоимости тепловой обработки металла в нагревательной печи. Ее составляющими являются затраты на мазут, на подачу воздуха в мазутные форсунки для горения мазута, на удаление продуктов сгорания мазута в окружающую среду, на теплоноситель, подаваемый в подогреватель мазута, на амортизационные отчисления.

Переменная часть дисконтированных затрат выражена в аналитическом виде как функция от температуры подогрева мазута.

Для решения задачи (1) получена аналитическая зависимость  $Z_f$  на основе разработанной математической модели процессов теплообмена и тепловых балансов в нагревательной печи и в подогревателе мазута.

Предложенное выражение для переменной части дисконтированных затрат на тепловую обработку металла имеет вид:

$$Z = (S_m + S_b + S_{m.э} + S_{ам}) + P_n K, \quad (2)$$

где  $S_m, S_b, S_{m.э}, S_{ам}$  — затраты на мазут; на дутьевой воздух, идущий на горение мазута; на теплоноситель, подаваемый в подогреватель мазута; на амортизационные отчисления, руб./год;  $P_n$  — норма дисконта инвестиций, 1/год;  $K$  — капитальные вложения в подогреватель мазута, руб.

Составляющие правой части выражения (2) рассчитываются:

$$\begin{aligned} S_m &= C_m \cdot B; \quad C_m = P_m \cdot h; \quad S_b = C_b \cdot N_{m.g} \cdot h \cdot V_b; \\ S_{m.э} &= 3,6C_{m.э} \cdot Q_{m.э}; \quad C_{m.э} = P_{m.э} \cdot h; \quad Q_{m.э} = D_n \cdot h_n''; \\ S_{ам} &= \Pi \cdot K; \quad K = P_m F_m + C_{m.g} \cdot N_{m.g} V_b; \quad V_b = B \cdot u_b \end{aligned} \quad (3)$$

где  $B$  — расход мазута, кг/ч;  $C_m$  — годовые затраты на 1 кг мазута, (руб/кг) (ч/год);  $P_m$  — стоимость мазута, руб/кг;  $h$  — время работы нагревательной печи в течение года, ч/год;  $C_b$  — стоимость электрической энергии, руб/(кВт · ч);  $N_{m.g}$  — суммарная мощность вентилятора и дымососа, приходящаяся на 1 м<sup>3</sup> дутьевого воздуха, кВт/м<sup>3</sup>;  $V_b$  — часовой расход воздуха, идущий на горение мазута, м<sup>3</sup>/ч;  $\Pi$  — норма амортизационных отчислений, 1/год;  $C_{m.э}$  — стоимость теплоносителя, (руб/кДж) · (ч/год);  $D_n$  — расход теплоносителя, подаваемого на подогрев мазута, кг/ч;  $h_n''$  — энтальпия теплоносителя на входе в подогреватель мазута, кДж/кг;  $P_m$  — затраты на 1 м<sup>2</sup> поверхности нагрева подогревателя мазута, руб/м<sup>2</sup>;  $F_m$  — площадь поверхность нагрева подогревателя мазута, м<sup>2</sup>;  $C_{m.g}$  — стоимость вентилятора и дымососа, отнесенная к 1 кВт их мощности, руб/кВт;  $u_b$  — расход воздуха на 1 кг мазута, подаваемого в мазутные форсунки, м<sup>3</sup>/кг;  $Q_{m.э}$  — расход тепловой энергии, подаваемой в подогреватель мазута, Вт;  $P_{m.э}$  — стоимость теплоносителя, руб/кДж.

Выражение для расхода тепловой энергии получено из уравнения теплового баланса подогревателя мазута:

$$Q_{m.э} = \frac{B(C_t'' \cdot t_t'' - C_t' \cdot t_t') h_n''}{(h_n'' - h_n') \cdot \eta_n}, \quad (4)$$

где  $C_t', t_t'$  — температура и теплоёмкость мазута на входе в подогреватель мазута;  $C_t'', t_t''$  — температура и теплоёмкость мазута на выходе из подогревателя мазута;  $h_n''$  — энтальпия теплоносителя на выходе из подогревателя мазута;  $\eta_n$  — термиче-

ский коэффициент полезного действия подогревателя мазута.

Выражение для расчета оптимальной температуры подогрева мазута получим, представив площадь теплопередающей поверхности подогревателя мазута и расход мазута на тепловую обработку металла как функции от температуры подогрева мазута.

Выражение для расхода мазута получено из уравнения теплового баланса нагревательной печи.

$$B = \frac{D}{E_2 + C_t'' \cdot t_t''}. \quad (5)$$

$$D = Q_1 + Q_5 + Q_6 + Q_7 - Q_{экс};$$

$$\begin{aligned} E_2 &= Q_n^p(1 - R_2) - (C_r \cdot t_r + R) v_r + \\ &+ C_b'' \cdot v_b(t_b'' - \delta t_b) - C_t' \cdot \delta t_t, \end{aligned}$$

где  $Q_1$  — тепло, передаваемое металлу при его нагреве, Вт;  $Q_5, Q_6, Q_7$  — потери тепла через теплое ограждение печи, открытые окна и неучтенные потери, Вт;  $Q_{экс}$  — тепло экзотермических реакций, Вт;  $Q_n^p$  — низшая теплота сгорания мазута, Дж/кг;  $R, Q_n^p, R_2$  — потери тепла от химической и механической неполноты сгорания мазута, Вт;  $C_r, t_r, v_r$  — средняя теплоемкость, температура, количество уходящих газов на 1 кг сжигаемого мазута;  $C_b'', t_b''$  — средняя теплоемкость и температура воздуха;  $\delta t_b, \delta t_t$  — падение температуры воздуха и мазута при движении их до мазутных форсунок.

Площадь теплопередающей поверхности подогревателя мазута определяется по выражению [10]:

$$F_m = \frac{B(C_t'' \cdot t_t'' - C_t' \cdot t_t')}{\Delta t \cdot K \cdot \psi}, \quad (6)$$

где  $\Delta t$  — средний температурный напор в подогревателе мазута, К;  $K$  — коэффициент теплопередачи в подогревателе мазута, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $\psi$  — поправочный коэффициент при сложной схеме теплообмена.

Температурный напор в подогревателе мазута определяется по выражению, позволяющему рассчитывать  $\Delta t$  с погрешностью не более 2 % [11]:

$$\begin{aligned} \Delta t &= a'(t_n' - t_t') + b'(t_n'' - t_t''), \\ \Delta t &= d_1 - f_1 \cdot t_t''. \end{aligned} \quad (7)$$

где  $t_n', t_n''$  — температура теплоносителя на входе и выходе из подогревателя мазута;  $a', b'$  — коэффициенты.

Подставив в (2) величины (3)–(7), получим выражение для переменной части дисконтированных затрат на нагрев металла:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{D}{E_2 + C_t'' \cdot t_t''} \times \\ &\times \left[ \left( \frac{C_m}{K\psi(d_1 - f_1 t_t'')} + \frac{3,6C_{m.э} h_n''}{(h_n'' - h_n') \eta_n} \right) (C_t'' \cdot t_t'' - C_t' \cdot t_t') + C_m + C_b'' v_b \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

При выводе формулы для расчета оптимальной температуры подогрева мазута  $t_{f\text{опт}}$  использован классический метод решения задач оптимизации. Исходя из необходимых условий оптимальности  $\partial Z / \partial t_t'' = 0$  и выражения (8), получено уравнение, позволяющее рассчитывать  $t_{f\text{опт}}$ :

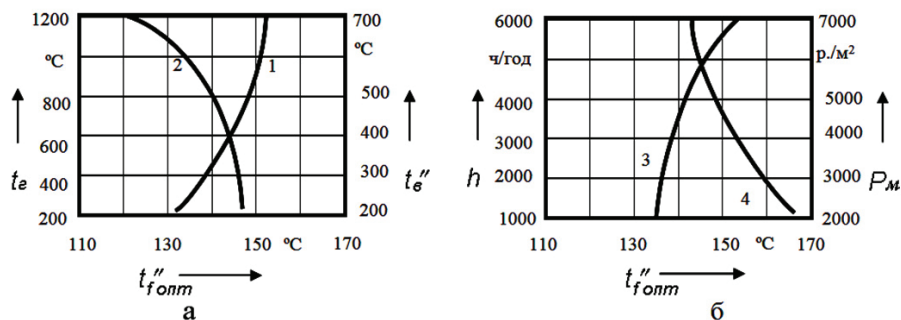


Рис. 1. Зависимость оптимальной температуры подогрева мазута  
а — от температуры уходящих газов и воздуха;

б — от времени работы печи и от стоимости подогревателя мазута:  
1 —  $t''_{f onm} = f(t_g)$ ; 2 —  $t''_{f onm} = f(t''_e)$ ; 3 —  $t''_{f onm} = f(h)$ ; 4 —  $t''_{f onm} = f(P_M)$

$$a_f t''_f{}^2 + b_f t''_f + d_f = 0, \quad (9)$$

где

$$a_f = (h''_n - h'_n) \eta_n \cdot f_1 \cdot C''_f \times \\ \times [C'_m \cdot C''_f - (C_m + C'_b \cdot v_b) K \cdot \psi \cdot f_1] + \\ + 3,6 C_{m,3} h'' \cdot K \cdot \psi \cdot f_1^2 \cdot C''_f (E_2 + C'_f \cdot t'_f);$$

$$b_f = 2(h''_n - h'_n) \eta_n \cdot f_1 \cdot C''_f \times \\ \times [(C_m + C'_b v_b) K \cdot \psi \cdot d_1 - C_m C'_f t'_f] - \\ - 7,2 C_{m,3} \cdot h'' \cdot K \cdot \psi \cdot d_1 \cdot C''_f \cdot f_1 (E_2 + C'_f t'_f);$$

$$d_f = 3,6 C_{m,3} \cdot h'' K \cdot \psi \cdot d_1^2 \times \\ \times C''_f (E_2 + C'_f t'_f) + (h''_n - h'_n) \cdot \eta_n \times \\ \times [C'_m E_2 (C''_f \cdot d_1 - C'_f \cdot t'_f \cdot f_1) + C'_m \cdot C'_f \cdot C''_f \cdot t'_f \cdot d_1 - \\ - K \cdot \psi \cdot C''_f \cdot d_1^2 (C_m + C'_b \cdot v_b)].$$

Вывод искомым выражений производился при допущениях, что производительность нагревательной печи постоянна, нагрев металла ведется при постоянной температуре печи.

Разработан алгоритм и программа определения оптимальной температуры подогрева мазута  $t''_{f onm}$ , учитывающая тип мазутных форсунок и параметры теплоносителя. Уравнение (9) обеспечивает лишь необходимые условия оптимальности. Поэтому оно проверялось на достаточность путем проведения исследований на существование экстремума в испытываемой точке и выполнение условия положительной определенности квадратичной формы второго дифференциала от целевой функции  $\partial^2 Z / \partial t''_f = 0$ . Проведенные расчеты подтвердили, что значения  $t''_{f onm}$ , определенные по уравнению (9), отвечают минимуму целевой функции, то есть его решение при выполнении условия  $\partial Z / \partial t''_f = 0$  существует и единственно.

Выполнены численные исследования с целью установления зависимости и характера влияния различных параметров и факторов на  $t''_{f onm}$ . Анализ их результатов позволил определить следующее:

1) изменения расхода теплоты на подогрев мазута, термического коэффициента полезного действия подогревателя мазута, мощности вентилятора и дымососа, производительности нагревательной печи незначительно влияют на значение  $t''_{f onm}$ , что существенно упрощает ее расчет;

2) уменьшение температуры газов  $t_g$ , уходящих из рабочего пространства печи, снижает  $t''_{f onm}$  до 13 % (рис. 1а);

3) повышение температуры воздуха  $t''_e$ , подаваемого на сжигание мазута в мазутные форсунок, уменьшает  $t''_{f onm}$  до 32 % (рис. 1а);

4) увеличение продолжительности работы нагревательной печи  $h$  повышает  $t''_{f onm}$  до 26 % (рис. 1б);

5) повышение затрат на подогреватель мазута  $P_M$  снижает  $t''_{f onm}$  до 24 % (рис. 1б).

Реализация разработанного алгоритма в кузнечном цехе предприятия Омска, использующего в качестве топлива мазут ТКМ-16, позволила определить оптимальную температуру его подогрева — 428 К.

При расчете составляющих переменной части годовых расходов на нагрев металла приняты следующие показатели: время использования установленной мощности — 3360 ч/год, температура уходящих газов — 1373 К, температура подаваемого на горение воздуха — 523 К, температура пара на входе в подогреватель мазута — 453 К, стоимость мазута — 5200 руб/т.

Средняя эксплуатационная температура подогрева мазута в цехе составляла 383 К. Как показали расчеты, повышение температуры его подогрева до рекомендуемого оптимального значения дает возможность повысить термический КПД нагревательной печи, уменьшить удельный расход мазута на нагрев металла на 3,5 % за счет снижения коэффициента расхода воздуха, химического и механического недожога, потерь теплоты с уходящими газами.

Таким образом, разработанный алгоритм определения оптимальной температуры подогрева мазута аналитически увязывает теплотехнические, конструктивные, режимные параметры и дисконтированные затраты на нагрев металла. Результаты работы подтверждают целесообразность его использования при проектировании и эксплуатации печных агрегатов.

#### Библиографический список

1. Борушко А. П., Глухов В. Ф. Исследование сжигания сверхподогретого мазута в котлоагрегатах большой мощности // Теплоэнергетика. 1973. Вып. 3. С. 56–62.
2. Булгаков В. Г., Чернышев Е. В., Цирульников Л. М., Эрнест А. К. О целесообразности высокотемпературного по-

догрева мазута перед распылением // Теплоэнергетика. 1978. № 9. С. 51–53.

3. Пелешок А. Г., Синякович Б. Г. К вопросу о высоко-температурном подогреве мазута перед сжиганием // Теплоэнергетика. 1981. № 3. С. 109–115.

4. Глухов Б. Ф., Белосельский Б. С. Некоторые особенности распыления высокоподогретого мазута // Теплоэнергетика. 1986. № 9. С. 36–39.

5. Глухов Б. Ф. Эксплуатационные исследования сжигания мазута в котле ТП-35У // Сб. трудов ЛИСИ. Л., 1984. С. 101–105.

6. Cz. X. Szargut Ian, Koziot Ioachim, Majza Eugeniusz Analiza mozliwosci zmniejszenia zuzycia paliwa w piecach grzejnych // Gosp. paliw. i energy. 1986. Vol. 34, No. 4. P. 9–13.

7. Coombs M., M. Strumpf D, Kotchic R. [et al.]. A high-temperature flue gas heat recovery system // Gas Wdrme International. 1983. No. 7/8. P. 292–296.

8. Kohnken K. H. Energy Conservation-vital in todays comprtitive international to increase thermal efficiency // Industrial Heating. 1983. No. 7. P. 17–19.

9. Irretier Olaf. Resource savings and energy efficiency in heat treatment shops // Heat Process. 2014. Vol. 12, No. 1. P. 47–52.

10. Stumpp Hermann. Energy and global natural resources – from the point of the Furnace Industry // Heat Process. 2013. Vol. 11, No. 1. P. 92–93.

11. Бакластов А. М. Проектирование, монтаж и эксплуатация теплоиспользующих установок. М.: Энергия, 1970. 568 с.

**ПАРАМОНОВ Александр Михайлович**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: amparamonov@mail.ru

#### Для цитирования

Парамонов А. М. Повышение эффективности сжигания мазута в нагревательных печах кузнечного и термического производства // Омский научный вестник. 2018. № 1 (157). С. 28–31. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-28-31.

Статья поступила в редакцию 15.11.2017 г.

© А. М. Парамонов

УДК 621.316.3

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-31-35

**С. С. ГИРШИН**  
**Ч. П. МОНГУШ**  
**С. В. БИРЮКОВ**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## РАСЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРИ ВЕРОЯТНОСТНОМ ЗАДАНИИ НАГРУЗОК

В статье рассмотрена задача расчета потерь активной мощности в линии электропередачи при вероятностном задании нагрузок с учетом температурной зависимости сопротивления. Предложена расчетная формула для потерь мощности, построены и проанализированы зависимости потерь мощности от тока в детерминированной форме и математического ожидания потерь мощности от математического ожидания тока. В результате анализа приведенных зависимостей выявлено, что расчет потерь мощности в вероятностной форме при использовании распределения Релея дает наилучшие результаты для не очень больших токов. При токах, близких к допустимому, начинает сказываться влияние области кривой распределения, где невозможно установление теплового равновесия.

**Ключевые слова:** потери мощности, потери электроэнергии, вероятностно-статистические методы, закон Рэлея, математическое ожидание, среднеквадратичный ток.

**Введение.** Проблема потерь электроэнергии во всем мире стоит очень остро. В 2016 году потери энергии в сетях ПАО «ФСК ЕЭС» (Публичное акционерное общество «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы») из 540,534 млрд кВт·ч сальдированного отпуска из сети составили 25,033 млрд кВт·ч (по уровню напряжения 330 кВ и выше 16,173 млрд кВт·ч,

220 кВ и ниже — 8,86 млрд кВт·ч (4,63 %) [1]. Потери энергии по регионам страны и по филиалам ПАО «МРСК Сибири» (Публичное акционерное общество «Межрегиональная распределительная сетевая компания Сибири») приведены в табл. 1, 2 [2].

По вышеприведенным данным можно отметить, что большинство отчетных потерь не соответствует уровню, установленному Энергетической стратегией