

УДК 621.78.012

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЙ НАГРЕВА

Пинчук Ю.С.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Петруша Ю.С.

## Введение

Наиболее важное значение в промышленности в настоящее время имеют следующие виды электрического нагрева: косвенный в печах сопротивления, прямой или контактный, дуговой, индукционный, электроннолучевой, плазменный. Поэтому для модернизации оборудования необходимо рассмотреть каждый из видов электрического нагрева, а также сравнить электронагрев и нагрев от сжигания топлива. Целью данного исследования является анализ технологического нагрева и сопоставление эффективности нагрева металла в газопламенной печи и индукционной установке.

Наиболее распространено кислородное горение, которое широко применяется при сжигании топлива. Технологический процесс включает ряд последовательных стадий.

В топку подается топливо и воздух. В зоне горения топлива выделяется теплота. Часть используется как полезная энергия, другая часть теряется в виде механического недожога с золой и шлаком, с уходящими газами в виде физической теплоты и не прореагировавших горючих компонентов в виде химического недожога, а также через стенки топочного устройства. Эффективность топки определяется на основании уравнения теплового баланса (1). Из уравнения теплового баланса вычисляется КПД топки (2). Топки – устройства для сжигания органического топлива с целью получения теплоты. Различают слоевые и камерные топки. Слойные применяются для сжигания твердого топлива. Камерные делятся на факельные и циклонные. В факельных сжигается газообразное, жидкое, пылевидное твердое топливо. В циклонных топках используются частицы диаметром меньше 5 мм при скорости воздуха до 100 м/с, подаваемого в виде закрученного потока. Достигаются  $t^\circ$  около  $2000^\circ\text{C}$ . Они используются для обезвреживания сточных вод. [1]

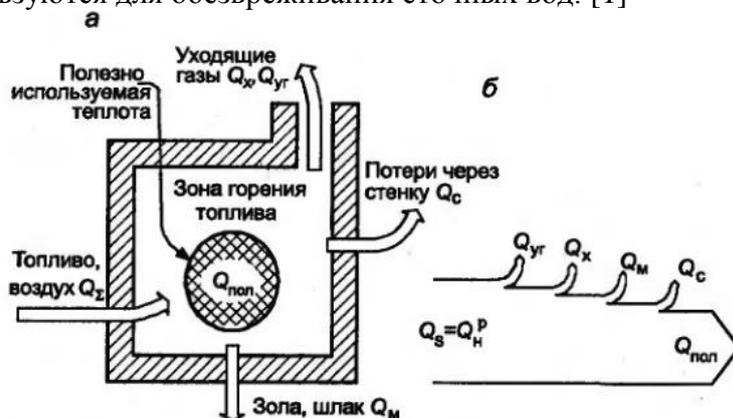


Рисунок 1. Технологическая схема топки а) и ее тепловой баланс б)

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{вз}} + Q_{\text{х}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{с}}, \quad (1)$$

$$\eta_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}, \quad (2)$$

## Электрический нагрев

Нагрев сопротивлением. Контактный способ применяется для нагрева металлов как по принципу прямого электрического нагрева – в аппаратах электроконтактной сварки, по принципу косвенного электрического нагрева — в нагревательных элементах. Электродный способ применяется для нагрева неметаллических проводящих материалов и сред. Нагреваемый материал или среда помещается между электродами, к которым подводится переменное напряжение.

Электродуговой нагрев. Для зажигания дуги электроды, присоединенные к источнику питания, на мгновение соприкасаются, а затем медленно разводятся. Сопротивление контакта в момент разведения электродов сильно нагревается проходящим по нему током. С ростом температуры скорость свободных электронов настолько возрастает, что они отрываются от металла электродов и вылетают в воздушное пространство. При движении они сталкиваются с молекулами воздуха и расщепляют их на положительно и отрицательно заряженные ионы. Происходит ионизация воздушного пространства между электродами, которое становится электропроводным. Под действием напряжения источника положительные ионы устремляются к отрицательному полюсу (катоде), а отрицательные ионы — к положительному полюсу (аноду), тем самым образуя длительный разряд — электрическую дугу, сопровождающуюся выделением тепла. Температура дуги: у катода — около 2400 °С, у анода — около 2600 °С, в центре дуги — около 6000 - 7000 °С. Основное практическое применение находит прямой электродуговой нагрев в дуговых электросварочных установках. В установках косвенного нагрева дуга используется как мощный источник инфракрасных лучей.

Индукционный нагрев. В переменном магнитном поле в куске металла будет индуцироваться переменная ЭДС, под действием которой возникнут вихревые токи, вызывающие нагрев. Наибольшее распространение получил индукционный нагрев металлических тел (деталей, заготовок) в машиностроении и при ремонте техники, а также для закалки металлических деталей.

Диэлектрический нагрев. При диэлектрическом нагреве материал, подлежащий нагреванию, помещается между металлическими электродами — обкладками конденсатора, к которым подводится напряжение высокой частоты (0,5 - 20 МГц и выше) от специального высокочастотного генератора. Установка для диэлектрического нагрева состоит из лампового генератора высокой частоты, силового трансформатора и сушильного устройства с электродами. Применяется главным образом для сушки и тепловой обработки древесины, бумаги, продуктов и кормов (сушки зерна, овощей и фруктов), молоко.

Электронно-лучевой (электронный) нагрев. При встрече потока электронов (электронного луча), ускоренных в электрическом поле, с нагреваемым телом электрическая энергия превращается в тепловую. Применяется в промышленности для сварки очень мелких деталей и выплавки сверхчистых металлов.

Кроме рассмотренных способов электронагрева, в производстве и быту находит применение инфракрасный нагрев (облучение).

#### Классификация электротехнологических установок

К электротехнологическому оборудованию относятся: электрические печи и электронагревательные установки, электросварочные установки всех видов, установки для размерной электрофизической и электрохимической обработки металлов.

В электропечах и электротермических устройствах сопротивления используется выделение тепла электрическим током при прохождении его через твердые и жидкие тела. Превращение электроэнергии в тепло в них происходит в твердых нагревательных элементах, от которых тепло путем излучения, конвекции и теплопроводности передается нагреваемому телу, либо в жидком теплоносителе - расплавленной соли, в которую погружается нагреваемое тело, и тепло передается ему путем конвекции и теплопроводности.

Плавильные печи сопротивления применяют преимущественно при производстве литья из легкоплавких металлов и сплавов. Работа плавильных дуговых электропечей основана на выделении тепла в дуговом разряде. В электрической дуге концентрируется большая мощность и развивается температура свыше 3500° С. Дуговая сталеплавильная печь используется при производстве фасонного литья из цветных металлов, их сплавов и чугуна. В дуговых печах прямого нагрева одним из электродов служит само расплавляемое тело. Эти печи предназначены для выплавки стали, тугоплавких металлов и сплавов.

В индукционных печах и устройствах тепло в электропроводном нагреваемом теле выделяется токами, индуктированными в нем переменным электромагнитным полем. Нагревательные индукционные печи и установки используют для нагрева заготовок под пластическую деформацию и для проведения разного рода термообработки. Индукционные термические устройства применяют для поверхностной закалки и других специализированных операций.

Трубчатые электрические нагреватели - ТЭНы:

Любой электрический нагреватель сопротивления представляет собой высокоомное сопротивление (нагревательный элемент), оборудованный вспомогательными устройствами для подвода тока, электроизоляции, защиты от механических повреждений, крепления. Обычно ТЭН состоит из тонкостенной (0,8 - 1,2 мм) металлической трубки (оболочки), в которой размещена спираль из проволоки большого удельного электрического сопротивления. Концы спирали соединены с контактным стержнем, наружные выводы которого служат для подключения нагревателя к питающей сети. Материалом трубки может быть углеродистая сталь, если температура поверхности ТЭНа в рабочем режиме не превышает 450°С, и нержавеющая сталь при более высоких температурах или при работе ТЭНа в агрессивных средах.

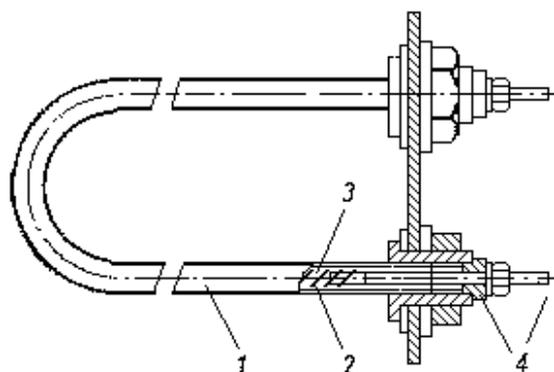


Рисунок 2 Конструкция ТЭНа

1 - Трубка; 2 - Нагревательный элемент; 3 - Изолирующий слой; 4 - Контактная группа.

Спираль изолируют от трубки наполнителем, имеющим высокие электроизоляционные свойства и хорошо проводящим теплоту. В качестве наполнителя, чаще всего, применяют периклаз (кристаллическая смесь магния). После заполнения наполнителя трубку ТЭНа опрессовывают. Под большим давлением периклаз превращается в монолит, надежно фиксирующий спираль по оси трубки ТЭНа. Опрессованный ТЭН может быть изогнут для придания необходимой формы. Контактные стержни ТЭНа изолируют от трубки изолятором, торцы герметизируют влагозащищенным кремнийорганическим лаком.

Преимущество ТЭНов - универсальность, надежность и безопасность обслуживания. ТЭны не боятся вибраций и ударов, но не являются взрывобезопасными. Рабочая температура ТЭНов может достигать 800°С. Вследствие герметизации спиралей срок службы ТЭНов достигает 10 тысяч часов.

К недостаткам ТЭНов следует отнести высокую металлоемкость и стоимость из-за использования дорогостоящих материалов (нихром, нержавеющая сталь), не очень высокий срок службы, невозможность ремонта при перегорании спирали.

Способы экономии электроэнергии в электрических печах:

1. Систематический контроль изоляции температуры электрической печи.
2. Улучшение герметичности электропечей.

3. Максимальное использование рабочего объема электропечи за счет плотной кладки одинаковых деталей, совместной обработки различных деталей, усовершенствование конструкций загрузочных приспособлений.

4. Применение автоматического регулирования температуры электрических печей. Снижение расхода электроэнергии на выработку тепла при этом происходит до 25%.

5. Применение электрических печей с переменным рабочим объемом (с подвижным сводом).

6. Уменьшение массы и размеров загрузочной тары электрической печи

7. Сушка изделий инфракрасными лучами.

8. Применение подогрева селитровых, соляных, масляных и других ванн трубчатыми, нагревательными элементами, опущенными непосредственно в обогреваемую среду, взамен подогрева ванн нихромовыми спиралями, размещенными в футеровке наружных стен ванн.

Сопоставление эффективности нагрева металла в газопламенных печах и индукционных установках твч (токи высокой частоты)

В соответствии с рекомендациями Департамента по энергоэффективности Госстандарта Республики Беларусь коэффициент пересчета электрической энергии в условное топливо принимают  $Kэ = 0,28$  т.у.т./МВт·ч (кг.у.т./кВт·ч) – усредненный удельный расход на отпуск электроэнергии от энергоисточников ГПО «Белэнерго». [5] Для природного газа составляет  $Kг = 1,15$  т.у.т./тыс. м<sup>3</sup> (кг.у.т./ м<sup>3</sup>). Стоимость условного топлива принимается в размере 215 долл. США/т.у.т. [4]

Рассмотрим процесс нагрева металла в газовой печи и индукционном нагревателе до температуры 1200 °С. 845 МДж/т – количество теплоты, которое поглощает 1 т металла. Примем, что КПД установки индукционного нагрева  $\eta_{и.н} = 70$  %. Тогда затраты электроэнергии на нагрев 1 т металла составят:

$$W_{и.н.} = \frac{845}{3,6 \cdot \eta_{и.н}} = 335,32 \left( \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}} \right) = 93,24 \frac{\text{кг}\cdot\text{у.т.}}{\text{т}}, \quad (3)$$

До реконструкции печи был принят КПД  $\eta = 12$  % (без учета затрат топлива на разогрев печи и во время простоев, в действительности средний КПД ниже). Следовательно, расход природного газа с теплотворной способностью 34,5 МДж/м<sup>3</sup> составит:

$$B_{г.н.} = \frac{845}{34,5 \cdot \eta_{г.н.}} = 204,1 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{т}} \right) = 240,33 \frac{\text{кг}\cdot\text{у.т.}}{\text{т}}, \quad (4)$$

Затраты с учетом принятой цены условного топлива при использовании индукционного нагрева составят:

$$З_{и.н.} = \frac{93,24 \cdot 215}{1000} = 20,05 \frac{\text{долл.США}}{\text{т}}, \quad (5)$$

Применение газопламенной печи приводит к удельным затратам в размере:

$$З_{г.н.} = \frac{240,33 \cdot 215}{1000} = 51,67 \frac{\text{долл.США}}{\text{т}}, \quad (6)$$

Таким образом, для того, чтобы в данном случае газовый нагрев с точки зрения энергоэффективности стал конкурентоспособным с индукционным, следует увеличить КПД газовой печи в  $51,67/20,05 = 2,58$  раза, то есть до 30,93 %.

Рассмотрим пример ОАО «Минский автомобильный завод»: 272 долл. США за 1000 м<sup>3</sup> природного газа (по курсу за 2013 год 1дол. США  $\approx$  9740 бел.руб. и стоимости 1000 м<sup>3</sup> природного газа приблизительно равной 2 686 970 бел.руб) при стоимости и 111,4 долл. США за 1000 кВт·ч.[6] Будем считать, что время работы нагревателя составляет около 6000 ч в год, а объем производства при производительности 1 т/ч, соответственно, 6000 т/год. Тогда при использовании индукционной нагревательной установки, дополнительные затраты с учетом тарифа за заявленную мощность 12,95 долл. США/кВт составят:

$$Z_{\text{и.н.}}(N) = \frac{12,85 \cdot 335,32 \cdot 12}{6000} = 8,68 \frac{\text{долл.США}}{\text{т}}, \quad (7)$$

За потребленную электроэнергию:

$$Z_{\text{и.н.}} = \frac{335,32 \cdot 111,4}{1000} = 37,35 \frac{\text{долл.США}}{\text{т}}, \quad (8)$$

Следовательно, общие затраты при использовании индукционного нагревателя будут равны:

$$Z_{\text{и.н.}}(N) + Z_{\text{и.н.}} = 8,68 + 37,35 = 46,03 \frac{\text{долл.США}}{\text{т}}, \quad (9)$$

Затраты при использовании газового нагрева составят:

$$Z_{\text{г.н.}} = \frac{204,1 \cdot 272}{1000} = 55,52 \frac{\text{долл.США}}{\text{т}}, \quad (10)$$

Таким образом, при существующих ценах на энергоресурсы газовая нагревательная печь сможет конкурировать с индукционным нагревателем уже при КПД 14,5%.

Если рассмотреть теоретическую задачу, в которой источником электроэнергии будет генерирующая установка с КПД  $\eta_{\text{э}}$ , (например, когенерационная установка), то выбор между газовым и электрическим нагревательным устройством с точки зрения использования первичного источника энергии (природного газа), можно осуществить на основе соотношения (11).

$$\eta_{\text{и.н.}} \cdot \eta_{\text{э}} = \eta_{\text{г.н.}}, \quad (11)$$

Например, при изменении  $\eta_{\text{э}}$  от 30 до 60 % КПД газопламенной печи, способной конкурировать по уровню энергозатрат с индукционным нагревателем ( $\eta_{\text{и.н.}} = 70\%$ ), необходимо будет увеличить от 21 до 42 % (рисунок 3). Тогда для того, чтобы использовать газовый нагрев взамен индукционного, новая газопламенная печь должна иметь КПД не менее 31 %.

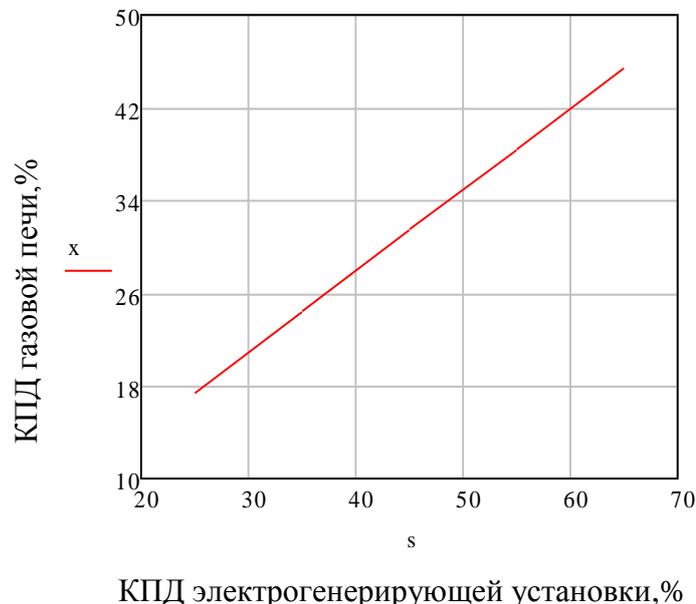


Рисунок 3 Изменение уровня КПД газовой печи, способной конкурировать по уровню энергозатрат с индукционным нагревателем ( $\eta_{\text{и.н.}} = 70\%$ ) при использовании электрогенерирующих установок с различным КПД

Полученные результаты позволяют сделать некоторые выводы:

1. При выборе способа нагрева либо оценке целесообразности модернизации газопламенной печи следует выполнить предварительный расчет эффективности данного

вида нагрева по сравнению с электрическими установками. С точки зрения энергоэффективности применение газового нагрева целесообразно лишь в том случае, если КПД пламенной печи превышает некое пороговое значение (в зависимости от конкретных условий и действующих тарифов на энергоносители).

2. Помимо показателей энергоэффективности необходимо оценивать различные варианты нагрева с точки зрения технологических преимуществ. В данном отношении индукционный нагрев обладает явными преимуществами по сравнению с газовым. К недостатком газового нагрева можно также отнести окисление.

3. В процессе расчетов следует учитывать, что применение рекомендаций Департамента по энергоэффективности Республики Беларусь относительно стоимости условного топлива приводят к некорректным результатам и завышению эффективности электронагрева. При выполнении обоснования энергосберегающих мероприятий более корректно использовать действующие тарифы на энергоресурсы. Допустима и необходима лишь сравнительная оценка энергопотребления при переводе различных источников энергии в условное топливо, а также сопоставление капитальных и эксплуатационных затрат. Необходимо также учитывать срок службы печи.

### Заключение

В настоящее время в Беларуси индукционный нагрев на промышленных предприятиях занимает значительное место и имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными нагревательными устройствами. Актуальными также остаются задачи по энерго- и ресурсосбережению, которые невозможно решить без внедрения нового высокопроизводительного и энергосберегающего оборудования. Положительной тенденцией является то, что в последние годы в Республике Беларусь освоен выпуск генераторов и оборудования индукционного нагрева отечественного производства.

После сравнительного анализа электрического нагрева и нагрева при сжигании топлива можно установить некоторые преимущества данного вида нагрева: очень простое и точное осуществление заданного температурного режима; возможность концентрации высоких мощностей в малом объеме; отсутствие воздействия газов на обрабатываемое изделие; возможность вести обработку в благоприятной среде (инертный газ или вакуум); малый угар легирующих присадок; высокое качество получаемых металлов; легкость механизации и автоматизации электротермических установок; возможность использования поточных линий; лучшие условия труда обслуживающего персонала. К недостаткам электрического нагрева можно отнести более сложную конструкцию и высокую стоимость установки и получаемой тепловой энергии.

Сопоставление эффективности нагрева металла в газопламенной и индукционной установках показало, что электронагрев является экономически более выгодным. Затраты при использовании индукционной печи в 1.2 раза меньше затрат при использовании газового печи.

При модернизации печи целесообразным будет использовать индукционные установки. Несмотря на высокую стоимость оборудования, данные установки имеют более высокий КПД, являются экологичными и модернизированными, не требуют дополнительных затрат на транспортировку природного газа, тем самым позволяют экономить затраты на их использование. Их стоимость вполне оправдывает себя в процессе эксплуатации.

### Литература

1. Андрижиевский, А.А. «Энергосбережение и энергетический менеджмент: учеб. пособие»/А.А. Андрижиевский, В.И. Володин.-2-е изд., испр.-Мн.:Выш.шк., 2005.-294с.
2. Сопоставление эффективности нагрева металла в газопламенных печах и индукционных установках ТВЧ / В. И. Тимошпольский [и др.] // Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. Вып. 35 / ред. колл.: В. И. Тимошпольский [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 40 - 45.