

УДК 66.045.12

## **К вопросу рекуперации теплоты газов печей термообработки металлических изделий**

**Бурокова А.В.** burokova@yandex.ru

канд. техн. наук **Рахманов Ю.А.**, rahmanovua2010@gmail.com

Университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*Рассмотрены методы рекуперации теплоты высокотемпературных дымовых газов печей термообработки металлических изделий. Приведены рекомендации по технологии рекуперации теплоты дымовых газов, как для внутреннего, так и для внешнего энергопотребления с использованием пластинчатых рекуператоров, котлов-утилизаторов и теплосиловых установок. Определена предполагаемая экономия топлива.*

*Ключевые слова:* потеря теплоты, высокотемпературные газы, рекуператор.

---

## **On the question of gas heat recovery heat treatment furnaces metal products**

**Burokova A.V.** burokova@yandex.ru **Rachmanov Y.A.** rahmanovua2010@gmail.com,

University ITMO

Institute of Refrigeration and Biotechnologies

9, Lomonosov Street, St Petersburg, 191002

*The methods of heat recovery high temperature flue gases from furnaces for a heat treatment of metal products are considered. The recommendations for the heat recovery technology of flue gases for both internal and external consumption using plate heat exchangers, waste heat boilers and thermal power plants are developed. The estimated fuel economy is determined.*

*Keywords:* heat loss, high temperature flue gases, recuperator.

---

В настоящее время энергосбережение является стратегической задачей государственного масштаба[12]. На многих предприятиях имеют место значительные энергетические потери за счет недостаточного использования теплоты в технологических процессах. В том числе, теплота газа, нагретого в процессе того или иного производства, либо используется не эффективно, либо не используется вообще, и нагретый газ выбрасывается в атмосферу. Это приводит к большим энергетическим потерям в объемах предприятия, страны, мира, а также определяет различные проблемы экологического характера. Особенно это характерно для высокотемпературных производств (до 1000 °С и более), т. е. именно там, где энергетические потери наиболее велики. Решением данной проблемы является рекуперация теплоты уходящих газов[3].

Преимуществом рекуперации является экономия энергии и сырья, и как следствие, экономия средств на эксплуатацию технологического оборудования и проведения технологического процесса.

Методы рекуперации весьма разнообразны. Их выбор определяется физико-химическими свойствами рекуперированных компонентов, качественным и количественным составом сырьевых и технологических материалов, характером технологических операций и т. д.

На металлургических и машиностроительных предприятиях одним из важнейших звеньев технологического процесса производства полуфабрикатов и деталей машин является термическая обработка, которая может сочетаться с химическим, деформационным, магнитным и другими воздействиями.

К термической обработке металлических изделий относятся следующие операции: отжиг, закалка, отпуск и химико-термическая обработка.

Для нагревания металла используют термические печи, которые в зависимости от источника энергии и вида топлива подразделяют на электрические, газовые, печи, работающие на жидком и твердом топливе, а также установки для нагрева токами высокой (ТВЧ) и промышленной частоты.

В термических печах температура металла, нагреваемого для термической обработки составляет 800-1000°C (за исключением отпускных печей), температура газов в рабочем пространстве печи достигает 850-1100°C. В нагревательных печах конечная температура нагреваемого перед прокаткой, ковкой и штамповкой металла колеблется от 1100 до 1250°C, а дымовых газов в рабочем пространстве печей – от 1200 до 1450°C. Температура уходящих из печей камерного типа дымовых газов приближается к конечной температуре нагрева металла, за исключением газов печей периодического (по температуре) действия. В печах методического (по ходу дымовых газов) действия, где нагреваемый металл движется навстречу охлаждающимся дымовым газам, температура уходящих дымовых газов несколько ниже приведенной, но составляет все же для термических методических (проходных) печей примерно 500-700°C и для нагревательных методических печей – примерно 700-1100°C.

Дымовые газы, покидающие рабочее пространство печей, имеют высокую температуру и поэтому уносят с собой значительное количество теплоты. Из рабочего пространства печей дымовые газы уносят тем больше теплоты, чем выше температура дымовых газов и чем ниже коэффициент использования теплоты в печи.

В нагревательных печах с уходящими дымовыми газами теряется около 60-65% располагаемой теплоты[1,3]. Снизить эти потери можно путем уменьшения их количества за счет снижения коэффициента избытка воздуха при сжигании топлива и присосов воздуха в рабочее пространство печи из окружающей среды через неплотности.

Утилизация теплоты уходящих дымовых газов за счет снижения их температуры может быть выполнена в двух направлениях: с возвратом утилизированной теплоты обратно в печь и без возврата этой теплоты в печь. Возврат части теплоты дымовых газов в печь может осуществляться путем предварительного подогрева за счет части теплоты дымовых газов, металла, топлива или воздуха перед их подачей в печь, что позволяет повысить коэффициент использования теплоты печного агрегата, температуру и качество горения топлива, а также снизить расход топлива и сопутствующие негативные

экологические воздействия. Предварительный нагрев металла за счет части теплоты уходящих дымовых газов ограничен и осуществляется в методических печах. Увеличение использования теплоты уходящих газов приводит к значительному возрастанию капитальных и эксплуатационных затрат на печи. Поэтому устанавливают температурный предел, ниже которого уменьшить температуру дымовых газов нецелесообразно (см. табл. 1)[7].

**Таблица 1. Тепловая характеристика промышленных печей, наиболее широко применяемых в металлургическом и машиностроительном производстве**

Типы печей	Температура в рабочем пространстве, °С	Полезно используемое тепло, %	Средняя температура уходящих дымовых газов, °С	Потери с уходящими дымовыми газами, %
Нагревательные колодцы	1300-1400	20-30	1250-1350	55-60
Методические прокатные печи	1300-1450	30-40	700-1100	30-45
Кузнечные камерные печи	1300-1450	10-15	1100-1200	55-65
Термические камерные печи	850-1100	15-20	800-950	35-50
Термические проходные (методические печи)	850-1000	25-35	500-700	25-35

Кроме потерь теплоты в виде физической теплоты уходящих дымовых газов, более или менее значительные количества теплоты теряются от химической неполноты сгорания, когда в уходящих газах содержатся горючие вещества – в основном окись углерода. Особенно велики эти потери бывают при отоплении печей бедным (низкокалорийным) газом.

Для предварительного подогрева топлива или воздуха уходящими газами перед их подачей в печь можно использовать рекуперативные и регенеративные теплообменники[3].

При втором способе утилизации часть теплоты уходящих дымовых газов можно использовать в котлах-утилизаторах (рекуператорах) для получения горячей воды или водяного пара, а также механической или электрической энергии с помощью теплосиловых установок[8,9], которые можно использовать на предприятиях, чем также достигается значительная экономия топлива.

В отдельных случаях оба способа могут использоваться одновременно. Но наиболее важное значение имеет утилизация теплоты уходящих газов с возвратом части теплоты в печь[11]. Это объясняется тем, что единица теплоты, отобранная у газа и вносимая в печь с воздухом или газом (единица физической теплоты), оказывается значительно ценнее единицы теплоты, полученной в печи в результате сгорания топлива, так как теплота подогретого воздуха (газа) не влечет за собой потерь теплоты с дымовыми газами. Т. е. использование подогретого воздуха вместо воздуха окружающей температуры улучшает

горение топлива в печи, снижает его химический и механический недожог. Ценность единицы физической теплоты тем больше, чем ниже коэффициент использования топлива и чем выше температура отходящих дымовых газов.

Утилизация теплоты уходящих дымовых газов позволяет достичь экономии топлива, причем экономия топлива зависит от степени утилизации теплоты уходящих газов, выраженной как отношение энтальпии подогретого воздуха к энтальпии отходящих из рабочего пространства газов. Степень утилизации теплоты также может быть выражена как КПД рекуператора[5].

Рекуперация теплоты, позволяет экономить до 30-40% потребляемой энергии. В результате, при том же расходе топлива количество теплоты, получаемой в процессе горения, увеличивается на 10-15%.

При рекуперации теплоты уходящих дымовых газов для внешних потребителей[5] экономия топлива в замещаемых котельных может быть рассчитана также следующим образом:

$$\Delta Q = V_r^0 * (c_r * t_r - c_r * t_{yr}),$$

где

$V_r^0$  – расход газа,  $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$

$c_r$  – теплоемкость газа,  $1,4 \text{ МДж}/\text{м}^3 * \text{°C}$

$t_r$  – температура газа в рабочем пространстве печи,  $900 \text{ °C}$

$t_{yr}$  – температура уходящих газов,  $120 \text{ °C}$

$$\Delta Q = 303,3 \text{ МДж}/\text{ч} = 84,25 \text{ кВт}$$

Экономия топлива  $\Delta B$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$  рассчитаем по формуле:

$$\Delta B = \frac{\Delta Q}{Q_n^p * \eta_{ку}},$$

где  $Q_n^p$  – низшая теплота сгорания топлива,  $33,73 \text{ МДж}/\text{м}^3$

$\eta_{ку}$  – КПД котельной установки, 0,9

$$\Delta B = 10 \text{ м}^3/\text{ч} = 87,52 \text{ тыс. м}^3/\text{год}$$

Таким образом, утилизация теплоты позволяет значительно экономить топливо и является одним из путей снижения стоимости нагрева металла в промышленных печах. Целесообразно стремиться к максимально возможной, экономически оправданной степени утилизации.

Однако утилизация не может быть полной, так как увеличение поверхности нагрева рационально только до определенных пределов, после которых оно уже приводит к очень незначительному выигрышу в экономии теплоты.

Как было сказано выше, утилизация теплоты уходящих газов происходит в рекуператорах – теплообменниках поверхностного типа для использования теплоты отходящих газов, в которых теплообмен между теплоносителями осуществляется непрерывно через разделяющую их стенку.

Рекуператор устанавливается на пути отходящих газов, например, из печи в дымовую трубу, а воздух в печь подается через смежные полости рекуператора и нагревается отходящими газами, проходящими вдоль нагретых стенок.

В зависимости от материала, из которого сделаны элементы рекуператора, последние подразделяют на металлические и керамические[10].

Металлические рекуператоры изготавливают из серого чугуна, углеродистой стали, а также из жаропрочных чугунов и сталей, хорошо противостоящих действию высоких температур. Металлические рекуператоры значительно компактнее керамических, имеют большую герметичность, однако имеют совсем небольшую стойкость при высоких температурах (от 600°C).

Элементы керамических рекуператоров изготавливаются из шамота, карборунда и карбошамота. Ценным свойством керамических рекуператоров является возможность работы в производственных условиях при подогреве воздуха свыше 500-700°C. Существенным недостатком керамических рекуператоров является низкая газоплотность, что влечет за собой понижение температуры уходящих дымовых газов.

Рекуператоры различают по схеме относительного движения теплоносителей – противоточные, прямоточные и с перекрестным движением сред.

Одним из основных критериев выбора теплоутилизационного оборудования является его предполагаемая эффективность, а также характер влияния его режимных параметров на основной рабочий процесс. Решающее значение имеет при этом достаточно надежное определение изменения условий эксплуатации и повышение стойкости основного оборудования, улучшение энергоэкологических показателей производства в целом при установке дополнительного оборудования.

В настоящее время представлен широкий диапазон выбора теплообменников, рекуператоров и т.д. Существующие сегодня конструкции рекуператоров имеют весьма серьезные недостатки, которые часто определяют отсутствие этих устройств в технологических процессах. Прежде всего, это:

- неудовлетворительные массогабаритные показатели;
- высокая стоимость и большой срок окупаемости;
- сложность или невозможность ремонта;
- низкая термопластичность (т.е. склонность к появлению термических напряжений, короблению и разрушению);
- высокое аэродинамическое сопротивление;
- склонность к зашлаковыванию (заращению рабочих зазоров продуктами горения).

Большая часть этих недостатков связана с размерами теплопередающих поверхностей: чем больше отношение площади этих поверхностей к объему и массе теплообменника, тем эффективнее устройство. У традиционных рекуператоров в силу разных причин этот показатель недостаточно высок.

Задача создания эффективных и недорогих теплообменных аппаратов, в частности рекуператоров, актуальна в настоящее время во всем мире. Одним из путей ее решения является повышение интенсивности теплообмена устройств, в основном, за счет развития их теплопередающих поверхностей.

Так, например, для увеличения поверхностей теплообмена трубчатых теплообменников широко используют спирально оребренные трубы. Но даже при оребрении трубчатые рекуператоры имеют недостаточно высокую эффективность, значительные габариты, вес, стоимость.

Одним из производителей трубчатых теплообменников является украинская фирма ЗАО «Кераммаш»[6]. Производимые ими трубчатые рекуператоры герметичны, применяются для подогрева воздуха. Трубы для рекуператоров изготавливают из различных марок сталей в зависимости от температуры продуктов сгорания и необходимой температуры подогрева воздуха. При этом возможен подогрев воздуха до 400°C и использование продуктов сгорания при температуре дымовых газов перед рекуператором до 900°C. В трубчатом петлевом рекуператоре возможно соответствующее температуре удлинение каждой трубы в отдельности. Схема и характеристики рекуператора представлены на рис. 1 и в табл. 2, соответственно.

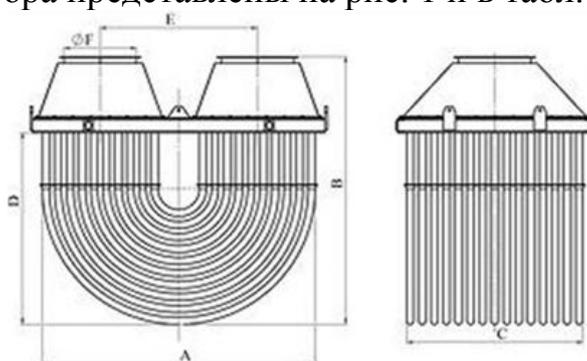


Рис. 1. Схема трубчатого теплообменника

**Таблица 2. Технические характеристики трубчатого петлевого рекуператора**

Наименование	Значение				
	подогрев воздуха				
Температура нагрева воздуха, °С	400	400	400	400	400
Температура дымовых газов, °С, не более	900	900	900	900	900
Производительность по воздуху, м <sup>3</sup> /ч	800	1400	6000	2700	4500
Площадь поверхности теплообмена со стороны продуктов сгорания, м <sup>2</sup>	11,5	19,5	87	31	68
Потеря давления по воздушному тракту, Па	800	1000	1000	1000	1000
Потеря давления по тракту дымовых газов, Па	25	35	40	40	40

Для рекуперации теплоты уходящих дымовых газов печей термической обработки металлических изделий представляется целесообразным применение пластинчатых теплообменников. В этих конструкциях необходимая поверхность теплообмена обеспечивается за счет большого количества тонкослойных плоских листов, при этом либо устройство должно иметь большой объем, либо зазоры между пластинами должны быть весьма малыми.

Другим ограничением применения пластинчатых теплообменников является их значительное аэродинамическое сопротивление, которое является следствием стремления увеличить поверхности теплоотдачи за счет малых зазоров между большим количеством пластин.

Наличие значительных аэродинамических сопротивлений исключает возможность теплообмена больших объемов газов (если только не допускаются весьма значительные габариты устройств, что возможно далеко не всегда). Продавливание через устройства с большими сопротивлениями значительных объемов газов с помощью мощных вентиляторов приводит к «схлопыванию» пластин и разрушению устройств.

Перечисленные выше недостатки пластинчатых теплообменников решены сотрудниками ООО «Бушевец-Термо», входящего в группу компаний «Бушевецкий завод», г. Бологое, где реализован инвестиционный проект по созданию нового поколения пластинчатых рекуператоров с характеристиками, превышающими (на своем секторе рынка) характеристики всех существующих устройств, включая зарубежные. Сегодня эту задачу можно считать решенной[2].

Базовым элементом таких рекуператоров стал новый металлургический полуфабрикат: листовая оребренная панель (рис. 2).

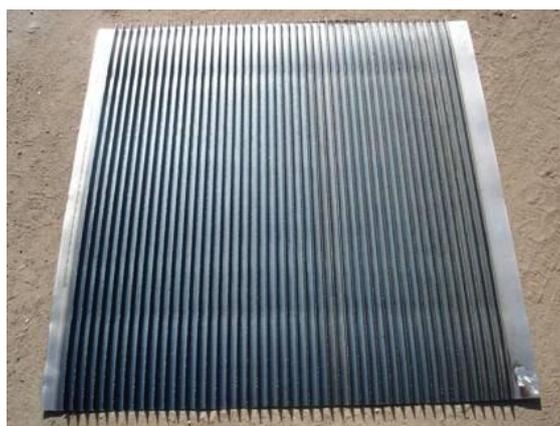


Рис 2. Листовая оребренная панель

Панель представляет собой тонкостенный плоский лист, на поверхность которого продольно, приварены вертикальные ребра, имеющие следующие геометрические размеры:

Толщина элементов, мм.....	1-3
Ширина панели, мм.....	до 1000
Длина панели, мм.....	до 6000
Высота ребер, мм.....	8-40
Шаг приварки, мм.....	10-80 и более

Оребренная панель представляет собой активную компактную теплообменную поверхность, параметры которой можно изменять в широких пределах для получения оптимальных характеристик рекуператора.

Площадь одного квадратного метра такой панели может иметь поверхность теплоотдачи 2-10 квадратных метров, что позволяет в равных объемах получать развитую поверхность, в несколько раз превышающую поверхность теплоотдачи трубчатых рекуператоров.

Индуктивная высокочастотная приварка ребер обеспечивает стабильность качества сварного соединения на всей длине шва, процесс не требует защитной атмосферы, присадок, предварительной зачистки свариваемых поверхностей. Благодаря особенностям способа сварной шов мало отличается от основного металла, равно прочен, пластичен, допускает изгибы и местную деформацию, не склонен к коррозии (в том числе межкристаллитной).

Разработанный процесс позволяет изготавливать панели из коррозионно-стойких, в том числе из жаропрочных сталей и сплавов с рабочей температурой до 1100-1250°С, а это в свою очередь позволяет изготавливать высокотемпературные рекуператоры.

Оребренные пластинчатые рекуператоры обеспечивают утилизацию теплоты с производительностью по газу от 200 до 200 000 м<sup>3</sup> в час, для теплоносителя с температурой от 200 до 1100 °С.

Конструкция рекуператоров представляет собой «слоеный пирог» в виде чередующихся полостей для нагревающей и нагреваемой сред (рис. 3).

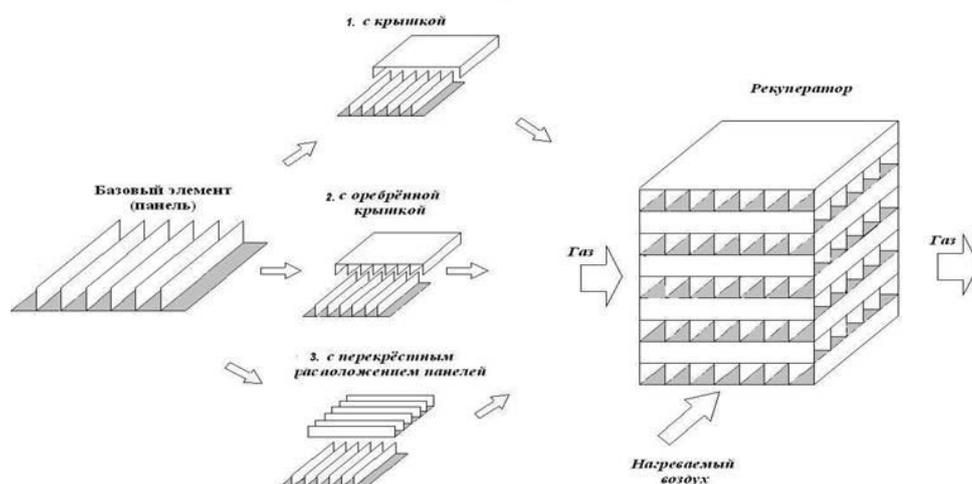


Рис. 3. Варианты сборки модулей рекуператора

На рис. 4 представлена модель ОПТ 1000-8/400-6.



Рис. 4. Рекуператор ОПТ 1000-8/400-6

Рекуператоры типа ОПТ обладают целым рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционно применяемыми устройствами:

– низкие массогабаритные показатели (в 2-10 раз меньше, чем у традиционных аналогов);

- простота обслуживания, транспортировки, монтажа и ремонта;
- низкие аэродинамические сопротивления;
- низкая инерционность;
- высокая термопластичность;
- возможность очистки и самоочистки газо-воздушных трактов от продуктов сгорания;
- быстрая окупаемость;
- наличие внутренней компенсации термических расширений, благодаря чему их часто можно использовать без компенсаторов.

Технические характеристики рекуператоров ОПТ в зависимости от требований заказчика могут меняться для оптимизации конструкции в широких пределах в зависимости от:

- скорости газовых сред (нагревающей и нагреваемой);
- шага оребрения и высоты ребер базового элемента рекуператора (оребреной панели);
- направления движения газовых сред;
- количества ходов воздушного тракта;
- компоновки модулей.

Подобные рекуператоры были установлены на ОАО «Ревякинский механический завод», ОАО «Лукойл Волгограднефтепереработка», ООО «Лукойл Ухтанефтепереработка» и др.[2]

Таким образом, в настоящее время имеется достаточно широкий спектр утилизационного оборудования для рекуперации теплоты высокотемпературных газов. Выбор технологии и оборудования для их рекуперации должен определяться в зависимости от конкретных условий производства и целей рекуперации.

### Список литературы

1. Гусовский В.П., Ладыгичев М.Г., Усачев А.Б. Современные нагревательные и термические печи. Справочник. – М.: Теплотехник, 2007. – 656 с.
2. Злотин В.Е., Злотин Д.В., Калинин Н.М. Эффективные рекуператоры тепла нового поколения. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=2428](http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2428).
3. Ключников А.Д. Высокотемпературные технологические процессы и установки. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 336 с.
4. Комплексный подход к энергоэффективному производству / под ред. Филиппенко И.Г. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. №3/1 (57), с. 38-45.
5. Лисиенко В.Т., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Христоматия энергосбережения. Справочное издание в 2-х книгах / Под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2005. – 768 с.

6. Металлические трубчатые петлевые рекуператоры. – [Электронный ресурс]. Режим доступа:<http://kerammash.ua/rus/index.htm>.

7. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. Учебник. Изд. 3-е, испр. – М.: «Металлургия», 1978, – 392 с.

8. Родионов А.И., Клушин В.Н., Систер В.Г. Технологические процессы экологической безопасности: Учебник для студентов технических и технологических специальностей. 3-е изд. перераб. и доп. — Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2000. — 800с.

9. Руководство по охране окружающей среды, здоровья и труда для производства изделий из металла, пластика и резины. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/8ff19800488557f1be74fe6a6515bb18/Metal%2BPlastic%2BRubber%2BProducts%2BMnfg%2B-%2BRussian%2B-%2BFinal\\_.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=8ff19800488557f1be74fe6a6515bb18](http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/8ff19800488557f1be74fe6a6515bb18/Metal%2BPlastic%2BRubber%2BProducts%2BMnfg%2B-%2BRussian%2B-%2BFinal_.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=8ff19800488557f1be74fe6a6515bb18).

10. Тебеньков Б.П. Рекуператоры для промышленных печей. – М.: Metallurgy, 1975. – 296 с.

11. Тинькова С.М., Прошкин А.В., Веретнова Т.А., Востриков В.А. Metallurgical heat engineering: a textbook (electronic version of lectures) // Institute of Colored Metals and Gold» FGOU VPO «Siberian Federal University». – Krasnoyarsk, 2007. – 193 с.

12. Федеральный закон от 23.11.2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» №261-ФЗ.