

# Утилизация вторичных энергетических ресурсов

д.т.н., проф. Лотош В.Е.

Приведена классификация вторичных энергетических ресурсов, отмечены масштабы и эффективность их использования в основных отраслях промышленности. Констатируется, что количественный и качественный рост потребления ВЭР непосредственно связан с проблемой общего возрождения народного хозяйства России.

## Utilization of secondary energy resources

by d.t.s., prof. V.E.Lotosh

The classification of secondary energy resources (SER) is given. The effectiveness of their utilization in the principal trades is noted. Stated that qualitative and quantitative growth of SER uptake directly relates to the problem of the common revival of Russia's economics.

### 1. Общие сведения

Второй закон термодинамики гласит, что вечный двигатель второго рода невозможен. Иными словами, нельзя создать такую периодически действующую машину, работа которой производилась бы лишь за счет охлаждения источника тепла без каких-либо изменений в других телах. Работа тепловой машины заключается не только в получении теплоты от теплогенератора и совершения работы, но и в передаче некоторого количества теплоты холодильнику (теплоприемнику с более низкой температурой). Теплота, поступающая в теплоприемник, составляет энергетические потери тепловой машины. Ее КПД всегда меньше 1.

Принципу работы тепловой машины подчиняется любой технологический процесс, поскольку в нем выполняется тот или иной вид работы и теряются различные формы энергии, включая тепловую. В частности, полный коэффициент по-

лезного использования природных энергетических ресурсов, т.е. в законченном жизненном цикле, составляет примерно 25% (таблица). Из таблицы следует, что наибольшие потери приходятся на установки, производящие преобразованные виды энергии (электроэнергия, теплота пара и горячей воды, обогащенное топливо), и на установки ее конечного использования (технологические аппараты).

Таблица

Распределение энергетических потерь  
на стадиях трансформации топлива

Стадия трансформации	Потери, %
Добыча и транспорт топлива	5
Преобразование первичного энергоресурса в передаваемый вид энергии	25
Передача энергии по коммуникациям	10
Энергоприемник производственных энергоиспользующих установок	5
Потери в технологических аппаратах	30
Полезное использование энергии	25

Энергетические выбросы могут существенным образом влиять на состояние окружающей среды.

Так, анализ выбросов теплоты в *атмосферу* от совокупности промышленных объектов показывает наличие регионов площадью до 10 тыс. км<sup>2</sup> с тепловыделением от 10 до 200 Вт/м<sup>2</sup>. Результатом такого теплового воздействия является образование устойчивого «острова теплоты» с температурой, на 1-4°С превышающей естественную для воздушной среды. Это приводит к возникновению в островах теплоты туманов, облачности, увеличению атмосферных осадков.

Сброс теплоты в *водоемы* повышает температуру континентальных и прибрежных вод. Это приводит к уменьшению содержания растворенных в них кислорода, диоксида углерода, азота, что негативно сказывается на воспроизводстве рыб, насекомых, растений.

Вместе с тем часть тепловых потерь, прежде всего установок конечного использования (технологических аппаратов), может быть утилизирована как вторичные энергетические ресурсы (ВЭР).

В соответствии с официальным определением, *вторичные энергоресурсы* – это энергетический потенциал (запас энергии в виде физической теплоты, потенциальной энергии избыточного давления, химической энергии и др.) продукции, отходов, побочных и промежуточных продуктов, которые не могут быть использованы в самом агрегате, но могут частично или полностью применяться для энергообеспечения других потребителей [1].

По виду содержащегося в них энергетического потенциала ВЭР подразделяются на три основных группы: горючие, тепловые и избыточного давления.

*Горючие ВЭР* – это отходы одного производства, которые могут быть утилизированы непосредственно в виде топлива в других производствах. К ним относятся, например, технологические газы черной и цветной металлургии, жидкие и твердые топливные отходы химической и нефтегазоперерабатывающей промышленности, щепы, опилки, стружка, щелоки деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной отраслей.

*Тепловые ВЭР* – это физическая теплота отходящих газов, основной и побочной (нецелевой) продукции производства: нагретых металла, шлаков и зол; горячей воды и пара, отработанных в технологических установках, системах охлаждения и пр.

Следует отметить, что тепловая энергия отходов, выходящая из технологического агрегата и используемая для подогрева вещественных потоков, поступающих в этот же агрегат (процессы регенерации и рекуперации), ко вторичным энергоресурсам не относятся.

*ВЭР избыточного давления* – это потенциальная энергия покидающих установку газов, воды, пара, имеющих повышенное давление, которое может быть еще применено перед выбросом в окружающую среду. Основное направление утилизации таких ВЭР – получение электрической или механической энергии.

Многие горючие ВЭР, например черной металлургии, имеют низкую теплоту сгорания и химически агрессивны. Это создает значительные трудности при их утилизации. Они же имеют место и при сжигании высококалорийных, но одновре-

менно легко воспламеняемых, взрывоопасных и токсичных ВЭР (водород, сухие абгазы и др.).

Для утилизации горючих вторичных энергетических ресурсов часто необходимо специальное оборудование, однако основной путь их использования – применение в агрегатах промышленных технологий.

Тепловые ВЭР – наиболее распространенный вид энергетических отходов. Их утилизация проводится практически повсеместно. В то же время привлекаются в основном высокопотенциальные (высокотемпературные) тепловые ВЭР (см. далее). Значительно меньше востребованы среднетемпературные энергетические отходы, низкотемпературные применяются еще реже.

Основное оборудование для использования тепловых ВЭР – котлы-утилизаторы (к/у), системы испарительного охлаждения промышленных печей, различного рода теплообменники, в том числе контактные нагреватели.

ВЭР избыточного давления образуются в ряде металлургических, химических, нефтеперерабатывающих производств. Ими могут обладать жидкие и газообразные отходы. Однако их применение пока не носит массового характера (избыточное давление доменного газа используют, например, в газовых бескомпрессорных турбинах).

По температуре, с которой тепловые ВЭР покидают технологические агрегаты, их делят на высоко-, средне- и низкопотенциальные.

Четкой градации ВЭР по этому признаку нет. Можно принять, что к *высокопотенциальным* относятся ВЭР, температура которых превышает наименьшую температуру газов в автогенном процессе сжигания топлива (не менее 600°C). К *низкопотенциальным* принадлежат ВЭР, представляющие собой жидкости с температурой менее 100°C и газы с температурой ниже 300°C [2]. В этом случае *среднепотенциальные* ВЭР по температуре будут занимать промежуточное положение между высоко- и низкопотенциальными энергетическими отходами.

В целом основными источниками тепловых ВЭР в различных отраслях промышленности выступают технологические агрегаты, как правило, недостаточно совершенные с энергетической стороны. Особенно неблагоприятны с точки зрения использования теплоты сгорания топлива нагревательные и термические печи (их тепловой КПД равен 12-18%), вагранки чугунолитейных цехов (теплопотери с га-

зами превышают 50-60%), паровые котлы низкого давления (КПД порядка 50%), паровые молоты кузнечных цехов (КПД не более 2-5%) и др.

Разработка методов и способов утилизации ВЭР промышленных предприятий в нашей стране началась в 20-30-е гг. 20 в. Тогда были заложены теоретические основы энергосбережения и предложены первые технические решения. Наиболее значительные достижения в практике утилизации тепловых отходов приходятся на послевоенные годы (конец 40-х–начало 50-х гг. прошлого столетия).

В 60-х–70-х гг. 20 в. за счет использования ВЭР в стране ежегодно экономилось около 20 млн т условного топлива. Примерно на этом же уровне (около 25 млн т/год) сохранялось энергоснабжение за счет ВЭР в следующие десять лет.

Однако следует отметить, что за этот период объем энергопотребления вырос в 2,4 раза, а общая экономия энергоресурсов снизилась с 270 за 60-70 гг. до 135 млн т/год условного топлива за последующее десятилетие.

Эта негативная тенденция была связана со снижением в 60-х гг. стоимости первичных энергоресурсов за счет массового вовлечения в топливный баланс страны нефти и природного газа.

Начиная с конца 70-х–начала 80-х гг., интерес к использованию ВЭР вновь возрастает, поскольку энергоемкость единицы валового внутреннего продукта в нашей стране существенно (до 11 раз в сравнении с Японией) превысила уже достигнутый за рубежом уровень.

По мере интеграции в мировую экономику и в связи с перспективой вступления страны в ВТО такое положение приводит к все большей неконкурентоспособности нашей продукции на мировом рынке. Именно поэтому в настоящее время одной из важнейших задач народного хозяйства России является всемерное использование ВЭР. Лидируют здесь рассматриваемая далее черная и цветная металлургия, а также некоторые другие сектора материального производства.

## 2. Черная металлургия

Эта отрасль промышленности России занимает первое место по вовлечению вторичных энергетических ресурсов. Их суммарный выход в пересчете на условное

топливо равен 30-50 млн т/год при максимально возможном показателе утилизации около 20 млн т.

На долю черной металлургии приходится около 40% тепловых и до 80% горючих ВЭР, применяемых в промышленности. Потребности предприятий с полным металлургическим циклом в топливе (без угля для коксования) только на 30-40% покрываются за счет его привоза и на 60-70% — вторичными энергетическими ресурсами).

По виду потенциала ВЭР черной металлургии представлены всеми группами (горючие, тепловые, избыточного давления). К горючим прежде всего относятся доменный, конвертерный и коксовый газы. Они же являются высокопотенциальными тепловыми выбросами с температурой от 300 до 1600°C, а доменный газ обладает также избыточным давлением. Из металлургических печей выносятся 30-50% тепла, охлаждающими элементами воспринимается 8-20% и до 5% рассеивается в окружающую среду.

Наиболее мощным вторичным энергетическим ресурсом является доменный, или, точнее, *колошниковый* газ. В частности, за счет его сжигания в газовом балансе металлургических предприятий покрывается 35-45% потребности в теплоте. Характеристика колошникового газа: температура 175-250°C, выход 1100-2200 м<sup>3</sup>/т чугуна; состав, %: 23-40 CO, 12-22 CO<sub>2</sub>, 1,5-6,0 H<sub>2</sub>, остальное – азот; теплота сгорания ~4 МДж/м<sup>3</sup>; давление на колошнике до 0,4 МПа.

Очищенный от пыли [3] колошниковый газ применяется главным образом в доменных воздухонагревателях, энергетических котлах, для отопления коксовых батарей, нагревательных колодцев и печей прокатного производства. В данных случаях реализуется его горючий и тепловой потенциалы. Первый обусловлен горением CO до CO<sub>2</sub>.

Кроме того, доменный газ, обладая избыточным давлением, используется также в газовых бескомпрессорных турбинах. В 80-е гг. 20 в. себестоимость электроэнергии, вырабатываемой в них, была в 1,5-2,0 раза ниже получаемой на ТЭЦ завода и в 3,0-3,5 раза меньше, чем в единой энергетической системе (срок окупаемости не более двух лет).

В США, Японии, Великобритании, Франции, Германии имеются десятки газотурбинных установок, работающих на колошниковом газе. Германия, установив,

в частности, газовые турбины на всех крупных доменных печах, ежегодно вырабатывает на них до 360 млн кВт-ч электроэнергии.

К ВЭР доменного производства относится также теплота отходящих газов воздухонагревателей, составляющая 15-20% от ее расхода на подогрев доменного дутья. Их температура колеблется в пределах 150-600°C. Они могут быть использованы для выработки пара, горячей воды или для подогрева доменного газа перед входом в газовую турбину.

Вторым (после доменного) по значению источником оксида углерода на предприятиях черной металлургии является *конвертерный* газ. Его усредненный состав при плавке с верхней и нижней продувкой, %: 67-79 CO, 13-16 CO<sub>2</sub>, по 0-3 H<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, 5-14 N<sub>2</sub>. Теплота сгорания газа составляет 8,4-9,2 МДж/м<sup>3</sup> при его температуре на выходе из конвертера 1400-1600°C.

Расчеты показывают, что на крупном заводе с производительностью порядка 7 млн т/год конвертерной стали выход газа составляет ~570 млн т/год, или около 130 млн м<sup>3</sup> в пересчете на природный газ (при теплотворной способности последнего на уровне 40 МДж/м<sup>3</sup>). Таким образом, при выплавке 1 т стали с конвертерными газами выносятся энергетический потенциал, равный 17-20 м<sup>3</sup> природного газа.

На эффективность использования ВЭР конвертеров существенное влияние оказывает способ отвода газов от них. В настоящее время применяют три варианта:

с полным дожиганием CO перед котлом-утилизатором, т.е. с утилизацией физического тепла конвертерных газов и их энергетического потенциала. В этом случае в атмосферу сбрасывается обеспыленный охлажденный газ, содержащий CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и пары воды;

с частичным дожиганием CO перед котлом-утилизатором (при коэффициенте  $\alpha$  расхода воздуха, равном 0,3-0,6) и полным его сжиганием на «свече» при сбросе газов в атмосферу. В данном варианте используется их физическое тепло и, частично, энергетический потенциал;

без дожигания CO перед котлом-утилизатором и его сжиганием на «свече» при сбросе газов в атмосферу (отечественная практика) или применением в качестве топлива (иностраный опыт). В первом случае утилизируется лишь их физическое тепло (при  $\alpha = 0$ ).

В любом из рассмотренных вариантов очистка газов производится после их использования в котле-утилизаторе.

Схема утилизации тепла конвертерных газов с полным их дожиганием перед к/у применяется для агрегатов с емкостью садки по стали до 150 т. Сжигание осуществляется в газоходах паровых котлов. В этой схеме серийные котлы-утилизаторы, или ОКГ (охлаждатели конвертерных газов), имеют производительность по пару 160-210 т/ч при его пиковом давлении до 5 МПа.

В связи с внедрением в промышленность большегрузных конвертеров емкостью до 400 т стали и связанным с этим увеличением объема вдуваемого кислорода количество выделяющихся газов значительно возрастает. Их дожигание приведет к такому росту объема продуктов сгорания, который существенно увеличит габаритные размеры и стоимость всей установки. В этих условиях рациональной является система газоотвода без дожигания.

В котлах ОКГ-400 (цифра – масса садки металла в конвертере) паропроизводительность достигает 325 т/ч (в максимальном режиме).

Полагают, что системы ОКГ без дожигания целесообразны также для конвертеров с донной и комбинированной продувкой [4].

Охлажденный в ОКГ и очищенный конвертерный газ может улавливаться (направляться в газгольдер). В этом случае, в соответствии с иностранной практикой, газ поступает в струйные охладители и полые скрубберы, затем в трубы Вентури и далее в центробежные скрубберы (мокрые циклоны), после которых попадает в газгольдер. Такие системы улавливания конвертерного газа с усреднением его состава и расхода в газгольдерах (мокрых или сухих) и последующим использованием в качестве топлива весьма распространены за рубежом. В Японии ими оборудовано около 90% работающих конвертеров.

*Мокрые газгольдеры* представляют собой емкость для воды, над которой размещен резервуар телескопической конструкции (верх ее способен подниматься, увеличивая объем резервуара).

В *сухих газгольдерах* поршень поднимается и опускается в результате изменения объема газа. Его верхнее положение соответствует полному заполнению газгольдера.

Вместимость газгольдеров составляет от 30 до 70 тыс. м<sup>3</sup> при производительности конвертеров 150-330 т.

Отметим, что на отечественных заводах конвертерный газ не улавливается.

В целом его энергетический потенциал в настоящее время используется лишь частично и только в самом конвертерном производстве. В качестве причин, сдерживающих полную утилизацию этого газа, обычно указывают нестабильность его выхода, изменяющийся по ходу плавки состав, взрывоопасность при содержании в нем 12,5-75% CO.

*Коксовый* газ – третий крупный источник горючих ВЭР черной металлургии. Из 1 т сухой шихты, помимо 750-800 кг кокса, получают 320-330 м<sup>3</sup> коксового газа, а также 33 кг каменноугольной смолы, 80 – подсмольной воды, 11 – сырого бензола, 3 – аммиака, которые перерабатывают в химические продукты. Из искусственных газообразных топлив (доменного, смешанного, конвертерного, генераторного) коксовый газ обладает наибольшей теплотой сгорания (свыше 17 тыс. кДж/м<sup>3</sup>).

Следует отметить в целом высокий выход ВЭР в коксохимическом производстве (около 80% от первичного энергопотребления). Это прежде всего энергетический потенциал коксового газа, выполняющего функции теплового и горючего ВЭР, а также физическое тепло кокса (тепловой ВЭР, не относящийся к газовым).

Потенциал коксового газа как теплового ВЭР определяется тем обстоятельством, что он покидает печь с температурой 700-800°C и его теплосодержание составляет около 1000 МДж/т кокса, или до 30% расхода тепла.

Физическую теплоту коксового газа отбирают на разных стадиях охлаждения: в стояках коксовых камер – от 700-800 до 400°C; в газосборниках – от 400 до 82°C; в первичных холодильниках – от 82 до 30°C. Используется теплота первой и третьей стадий.

Для утилизации теплоты первой стадии стояки оборудуют теплообменниками, через которые в замкнутом контуре циркулирует теплоноситель. Его теплота может направляться для получения пара, горячей воды, нагрева органических теплоносителей. Теплота третьей стадии охлаждения применяется для подогрева улавливающих растворов цеха сероочистки коксового газа.

Физическая теплота кокса, выгружаемого из камеры, составляет порядка 50% от расходуемой на коксование. Ее утилизируют при сухом тушении кокса, т.е.

охлаждении последнего в камере циркулирующим инертным газом (азотом). Нагревшись до 750-800°C, газ поступает в теплообменник вторичного теплоносителя (паровой котел, воздухо- или газоподогреватель, подогреватель угольной шихты или сочетание различных теплоиспользующих аппаратов и силовых установок).

Наибольшее распространение получило сухое тушение кокса с подачей теплоты в котельные установки для выработки пара (давление в перегретом состоянии до 39 МПа, температура 440°C). Охлажденный до 150-170°C газ очищается в циклонах от пыли и возвращается в камеру тушения.

Сухой способ тушения позволяет утилизировать более 80% теплоты раскаленного кокса.

После охлаждения в системе отбора теплоты коксовый газ проходит сложную систему очистки от смол, аммиака и бензола [5]. После этого его отправляют в газгольдер, а оттуда потребителю топлива – непосредственно или через газосмесительную станцию.

Основной потребитель коксового газа как горючего ВЭР – металлургическое производство. В первую очередь он используется для нагревания мартеновских печей и агрегатов термообработки металла. При достаточном количестве его применяют также в нагревателях коксовых батарей. В этом случае продукты сгорания на выходе из генератора имеют температуру 260-350°C, унося 15-20% подведенной теплоты. На некоторых предприятиях она расходуется на получение горячего воздуха для подогрева затворов угольной башни в зимнее время.

Структуру потребления коксового газа в качестве горючего ВЭР иллюстрируют данные по Японии, добившейся существенных результатов в его утилизации. В этой стране из общего годового потребления коксового газа (~10 млрд м<sup>3</sup>) на обогрев коксовых печей расходуется около 22%, в металлургическом производстве – 56, в городских отопительных системах – 10, на ТЭЦ – 8% и т.д. [6]. В ней же энергию коксового газа довольно широко используют в газовых турбинах, соединенных в одном цикле с генераторами электрического тока.

Еще одним крупным источником горючих ВЭР является *газ закрытых ферросплавных печей*. Его выход составляет 400-800 м<sup>3</sup>/т сплава при концентрации СО в нем 70-90%. После мокрого пылеулавливания на некоторых отечественных заводах он утилизируется как топливо, но в большинстве случаев сжигается на свечах.

Помимо рассмотренных выше наиболее крупных горючих и тепловых ВЭР можно отметить наличие ряда других источников, преимущественно тепловых. Это газы агломерации, обжига известняка и окатышей, мартеновских, электросталеплавильных, ваграночных, металлонагревательных печей, колодцев прокатного производства и др. Их температура колеблется от 800-900°C в печах с регенераторами до 900-1200°C в термических, прокатных и кузнечных устройствах (без регенерации).

Теплота уходящих высокотемпературных газов таких мощных промышленных агрегатов может быть использована газотурбинными установками, встроенными в газовый тракт для выработки электроэнергии и подачи газа и воздуха в печь. Для более полной утилизации теплоты уходящих газов за теплообменниками газотурбинных установок обычно устанавливают котел-утилизатор, поскольку температура продуктов сгорания еще значительна (~450-500°C). Он позволяет вырабатывать пар высоких параметров для технологических или энергетических нужд.

Поскольку температура газов после котла-утилизатора достаточно высока (порядка 200-250°C), их теплоту целесообразно использовать для коммунально-бытовых нужд, включая отопление (нагрев воды).

Резюмируя, отметим высокий уровень утилизации ВЭР черной металлургии, который уже в 1975 г. составлял более 96%, а на некоторых предприятиях приближался к 100% [7].

### 3. Цветная металлургия

Эта отрасль, как никакая другая, отличается разнообразием технологических процессов и оборудования: к ней относится производство не менее 70 элементов, а также многих сплавов. Данное обстоятельство предопределяет в несколько раз большее количество основных технологий и типоразмеров оборудования.

В связи с изложенным рассмотрение утилизации ВЭР цветной металлургии ограничивается здесь технологиями производства тяжелых цветных металлов, прежде всего меди, где этой проблеме традиционно уделяется большое внимание.

Очевидно, что отходящие газы плавильных и нагревательных печей, конвертеров, вельцпечей, шлаковозгоночных установок, агломерационных машин и дру-

гих агрегатов металлургии тяжелых цветных металлов различны по составу, температуре, количеству уносимого тепла, доле потерь его в тепловом балансе агрегата, непрерывности поступления, присутствию в газах горючих веществ, запыленности, агрессивности, токсичности и др.

Обычная температура уходящих газов наиболее крупных печей медеплавильных заводов составляет: шахтных 100-600°C, в кипящем слое 800-900, отражательной и кислородно-взвешенной плавки 1200-1400°C. Эти тепловые источники отличаются большим выходом и концентрацией энергии, часто стабильны в поступлении. Вместе с тем их характеризует большая запыленность и агрессивность, что создает трудности при утилизации.

Большое распространение традиционно имеет использование тепла отходящих газов плавки на штейн. Здесь наиболее эффективной является двухступенчатая утилизация: к/у и за ними воздухоподогреватели.

Можно выделить две группы процессов плавки на штейн: неавтогенные и автогенные.

К неавтогенным относятся традиционные способы плавки в отражательных, шахтных и электрических печах. В этой группе доминирует отражательная плавка.

Газы отражательных печей медеплавильных заводов являются одним из основных вторичных энергоресурсов. Их физическое тепло составляет 60-65% от тепла топлива, расходуемого печью. Состав газов, %: 15-18 CO<sub>2</sub>; 0-1 CO; 0,5-2,0 SO<sub>2</sub>; 0,5-3,0 O<sub>2</sub> (остальное – азот). Их температура 1150-1250°C.

Котлы-утилизаторы, стоящие за большинством отражательных печей, повышают коэффициент полезного использования тепла с 15-25 до 50-60%. Так, один из первых трубчатых вертикальных рекуператоров, установленный за отражательной печью Кировградского медеплавильного завода, позволил подогревать 85% воздуха, поступающего на горение топлива, до 230-280°C. Это предопределило увеличение на 15% проплава и снижение на 7,5% удельного расхода топлива печи.

В группе автогенных наибольшее распространение получил процесс взвешенной плавки, предусматривающей применение подогретого до 500-550°C воздуха. Одна из современных конструкций котла-утилизатора для печи взвешенной плавки введена в эксплуатацию в 1999 г. на заводе г. Аделаиды (Австралия). В котле предусмотрена специальная система очистки от налипающих частиц пыли. Его

основные технические данные: масса 450 т, масса арматуры 640 т, длина вместе с арматурой 56 м, высота 40, ширина 12 м, температура входящих газов 1450°C, выходящих 380°C, производительность по пересыщенному пару более 60 т/ч, его давление 60 бар [8].

По схеме печь – котел-утилизатор – воздухонагреватель используется также тепло отходящих газов медерафинировочных печей.

При обжиге медных концентратов, особенно в кипящем слое, выделяется большое количество избыточного тепла, которое поступает для выработки пара в котлах-утилизаторах. Наилучший отъем тепла из КС достигается при применении высококипящих теплоносителей, однако на практике чаще всего теплоносителем служит вода.

Конвертеры распространенного на медеплавильных заводах типа (садка меди 40 и 75 т) выделяют 20-40 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$  газов, потери тепла с которыми составляют 30%. Вместе с тем они как вторичные энергоресурсы используются недостаточно. Одним из исключений является завод «Ренскар» (Швеция), где конвертерные газы после осаждения грубой пыли в пылевой камере поступают в котел-утилизатор. Поверхность нагрева котла  $620 \text{ м}^2$ , производительность, в зависимости от нагрузки конвертера, достигает 40-100 т/сут пара.

Отходящие газы шахтных печей медной, никелевой и свинцовой плавок имеют теплотворную способность 200-700 ккал/ $\text{м}^3$ . Наиболее эффективна их утилизация для нагрева воздуха, идущего на дутье в печь. Ориентировочно это дает экономию топлива до 12-15% и облегчает обслуживание фурм. Воздухонагреватели можно устанавливать как самостоятельно, так и непосредственно в «свечах» печи.

В целом использование ВЭР в цветной металлургии ниже, чем в черной.

#### 4. Другие отрасли

К другим отраслям народного хозяйства, обладающим значительными ВЭР, следует прежде всего отнести машиностроение, производство цемента и иных строительных материалов, химическую, нефтехимическую, нефтеперерабатывающую и газовую промышленность.

На машиностроительных предприятиях тепловые ВЭР сравнительно высоких параметров образуются в основном в мартеновских, нагревательных и термических печах в виде теплоты отходящих газов, охлаждения установок и продукции. Кроме того, низкопотенциальная теплота содержится в отработанном паре прессов и молотов.

Для печей сравнительно небольшой тепловой мощности машиностроительных заводов наиболее целесообразны прямоточно-сепараторные котлы и котлы-утилизаторы низкого давления с принудительной циркуляцией. Последние более просты и надежны в эксплуатации, а качество питательной воды в них по сравнению с прямоточными может быть более низким.

Кроме того, весьма простым и достаточно эффективным средством утилизации теплоты отходящих газов на машиностроительных предприятиях является использование запечного парообразователя для выработки пара сравнительно невысоких параметров. В этом случае в парообразователь от ТЭЦ направляется первичный перегретый пар высокого давления, который смешивают с количеством конденсата, необходимым для доведения смеси до относительной влажности 0,80-0,85. Это достигается прохождением смеси по змеевику первой ступени, где влажный насыщенный пар становится сухим и перегретым. Перед входом во вторую ступень производят еще один впрыск конденсата, с помощью которого пар вновь доводят до относительной влажности 0,80-0,85. Во второй ступени впрыснутый конденсат испаряется, и пар опять становится насыщенным, а затем и перегретым, но с более низким, чем у первичного, давлением.

В промышленности строительных материалов тепловые газовые ВЭР образуются при обжиге цементного клинкера, извести, керамических изделий, производстве стекла, кирпича, огнеупоров, теплоизоляционных, железобетонных и других изделий. Потери теплоты здесь иногда достигают 40-50%. В целом вторичные энергетические ресурсы этой отрасли оцениваются в несколько миллионов тонн условного топлива.

К наиболее мощным источникам ВЭР промышленности строительных материалов относятся уходящие газы печей обжига цементного клинкера с температурой 1000-1100°C. Основная их доля утилизируется для предварительного подогрева исходной сырьевой смеси при сухом способе производства клинкера. Подогрев

можно осуществить несколькими способами, в том числе: а) в циклонном теплообменнике отходящими газами печей до 800-850°С с декарбонизацией шихты на 30-40%; б) на конвейерных машинах (печи Леполь).

Вынос весьма эндотермичных процессов декарбонизации, требующих до 60% необходимого для получения клинкера тепла, из обжиговой печи приводит к резкому снижению расхода топлива: с 5200-6700 (мокрый способ) до 3000-4200 кДж/кг клинкера. Удельная производительность печи при этом возрастает вдвое, что позволяет применять более короткие агрегаты.

Второй по мощности источник ВЭР в производстве строительных материалов – газы известеобжигательных печей. Они состоят главным образом из продуктов сгорания топлива и образующихся при разложении известняка. Их выход при использовании вращающихся печей равен 2500-3000 м<sup>3</sup>/т (температура 750-800°С).

Для уменьшения расхода топлива и утилизации тепла отходящих газов за вращающимися печами устанавливаются подогреватели (шахтные, ступенчатые, циклонные и др.), в которые направляют предназначенные для обжига кусковые материалы. Отсюда с температурой 500-700°С они поступают в печь, а из нее попадают в холодильник барабанного типа. При таком варианте расход тепла на обжиг снижается с 5900-7300 до 4600-5000 кДж/кг извести.

При другом прогрессивном способе обжига (в печи кипящего слоя) получаемая известь поступает в холодильник, где охлаждается воздухом и передается на склад. Подогретый воздух из холодильника поступает в газогорелочное устройство.

Известно использование теплоты отходящих газов керамзитовых печей для отопления и вентиляции производственных помещений. Установка способствует также улучшению условий труда рабочих на складах глины и транспортных галереях [9].

Запасы тепловых ВЭР в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и газовой промышленности также велики. Например, печи обжига колчедана имеют температуру отходящих газов порядка 650-900°С, генераторы технологического газа — 250-1100°С, трубчатые печи переработки нефти и мазута – 400-600°С. Эти и другие газы, как правило, направляются в котлы-утилизаторы для производства технологического и энергетического пара.

В котлах-утилизаторах газы существенно охлаждаются, например промежуточные продукты получения аммиака – от 900-1500 до 180°C, сернистый газ в производстве серной кислоты – от 850-950 до 400-450°C, нитрозные газы в технологии азотной кислоты – от 800-850 до 160-170°C и т.д.

Более 70% теплоты рассеивается с выхлопными газами (температура 270-400°C) газотурбинных установок на компрессорных станциях магистральных газопроводов. При их охлаждении до 160°C в утилизационных устройствах можно получить до 2,2-3,8 ГДж/ч на 1 МВт рабочей мощности газотурбинных установок.

В целом уровень освоения ВЭР в химической и нефтехимической промышленности удовлетворителен (свыше 80%). Низка их утилизация в газовой и цементной промышленности. В последней почти повсеместно в России применяется так называемый мокрый способ производства клинкера, использование ВЭР которого незначительно.

## 5. Особенности утилизации низкопотенциального тепла

Ранее рассмотренные источники ВЭР характеризовались высоким температурным уровнем, однако весьма значительно количество вторичных энергетических ресурсов со сравнительно низкими температурами. К ним относятся отходящие газы технологических и энергетических установок с температурами менее 300°C, вентиляционные выбросы (15-25°C), теплота отработанного пара, окружающего воздуха и, кроме того, конденсированных сред: подогретой и оборотной воды (25-40°C); высокотемпературных жидкостей (40-70); водоемов, рек, озер, морей (средняя температура 5-25°C), грунтовых вод (10-15), грунта (5-10) и др. [3].

Запасы низкопотенциального тепла (НПТ) огромны. Их *экономический потенциал*, т.е. величина энергии, получение которой из данного вида ресурса в настоящее время оправдано экономически, равен для России 31,5 млн т/год условного топлива даже без учета НПТ отходящих газов энергетических и технологических установок. Это составляет 22% общего энергопотребления страны, превосходит экономический потенциал ветра и солнечной энергии [10].

Далее рассматривается использование НПТ наиболее востребованных (газовых) выбросов.

Одним из солидных источников НПТ является отработанный производственный пар. Наибольшие его количества образуются при работе кузнечно-прессового оборудования на машиностроительных предприятиях.

Отметим, что КПД подобных механизмов сравнительно невелик и количество отработанного пара достигает 85-90% от в них подаваемого. Его давление обычно равно 0,20-0,25 МПа, энтальпия составляет 2510-2720 кДж/кг.

Энергию отработанного пара целесообразно использовать, непосредственно передавая ее рабочему телу: нагреваемой среде или турбогенератору. Это позволяет обеспечить хотя бы частичное теплоснабжение потребителя (отопление-вентиляция) или выработку электроэнергии на турбинах мягкого пара.

Известно, например, что отработанным паром молотов кузнечного производства отапливались собственные цехи и расположенный рядом электротехнический завод на Минском заводе шестерен. Экономия за отопительный сезон составляла до 20 тыс. т условного топлива. Также в Белоруссии теплота отработанного в автоклавах пара применялась для горячего водоснабжения, отопления жилых и административных зданий, технологических нужд нескольких комбинатов силикатных изделий. Это позволяло ежегодно экономить до 30% тепловой энергии [9].

Особенности утилизации НПТ связаны с их использованием в энергосиловых установках с легкокипящими теплоносителями, тепловых насосах, экономайзерах и теплообменниках, холодильных устройствах.

Установки с легкокипящими *теплоносителями* находят все большее применение. Часто в их качестве выступают органические вещества («холодный» пар, или *цикл Ранкина*).

Принцип действия установки можно проиллюстрировать примером использования в качестве легкокипящего теплоносителя фреона. В этом случае в греющем контуре установки пар давлением не более 0,12-0,20 МПа подогревает фреон до 70-85°C, что соответствует давлению паров последнего 1,4-1,6 МПа. Пары фреона направляют в турбину. Кроме электроэнергии, установка выдает конденсат греющего пара. В соответствии с расчетами, себестоимость электроэнергии, вырабатываемой в такой установке, в три раза ниже, чем на ТЭЦ [4].

Паротурбинные установки на органическом теплоносителе для производства механической и электрической энергии (мощность 50-800 кВт) нашли широкое

применение в Германии. В Японии на «холодном» паре работают установки мощностью до 3000 кВт.

Цикл Ранкина для выработки электроэнергии уже многие годы используется также на геотермальных станциях. Недавно он же внедрен на цементном заводе «Ленгфурт» (Германия) для утилизации тепла охлаждающего воздуха клинкерного холодильника.

На этом предприятии воздух из клинкерного холодильника (температура 275°C, объем 150 тыс. м<sup>3</sup>/ч) после очистки направляется в котел-утилизатор. Там основная масса тепла в обычном трубном теплообменнике передается маслу. Температура воздуха снижается при этом до ~125°C, масло нагревается до 230°C и поступает на установку, где реализуется цикл Ранкина.

Отличительная особенность установки заключается в циркуляции в ней пентана с температурой кипения 36,1°C. В противотоке с жидким маслом он нагревается до 162°C и испаряется (давление паров ~19 атм), приводя в действие двухступенчатую турбину, соединенную с обычным генератором переменного тока (690 В, 50 Гц). Мощность турбины составляет 1,1 МВт, удельные капитальные вложения равны 7164 немецким маркам.

В дальнейшем за счет цикла Ранкина фирма рассчитывает покрывать до 12% потребности предприятия в электроэнергии [11, 12].

За рубежом применяется также *цикл Калина*, основанный на использовании в качестве легкокипящего теплоносителя водно-аммиачной смеси, подаваемой на лопатки турбины. В Японии таким образом мощность установки для сжигания ТБО была увеличена на 20% и доведена до 4 МВт. В Калифорнии (США) благодаря циклу Калина выработка электроэнергии повысилась с 3,7 до 6,5 МВт [13].

Весьма эффективны при использовании НПТ *тепловые насосы* (ТН). Они предназначены для повышения потенциала (температуры) рабочего тела от величин, непригодных для использования в данном процессе, до достаточных для этого. Часто имеется в виду увеличение давления паров рабочего тела с целью повышения температуры его конденсации (рис. 14.2). Повышение ее до значений, превышающих температуру кипения этого рабочего тела при обычных давлениях, делает возможным его испарение (кипение). Данная схема соответствует второму за-

кону термодинамики. В согласии с ним теплота самопроизвольно передается только от более к менее нагретому телу.

Таким образом, в тепловом насосе энергия сжатия затрачивается на достижение температуры конденсации рабочего тела до уровня, превышающего температуру его кипения при нормальном давлении.

Этот процесс энергетически выгоден. С помощью теплонасосных установок, затрачивая на их привод 1 кВт·ч внешней электроэнергии, получают 3-6 кВт·ч тепловой энергии с более высоким потенциалом. В четырех наиболее продвинутых в этом отношении странах (США, Швеция, Великобритания, Германия) в настоящее время работает около 10 млн ТН, экономящих ~220 млн т/год условного топлива. В России насчитывается 2-3 тыс. действующих теплонасосных установок.

Известны три вида тепловых насосов: компрессионные, сорбционные и термоэлектрические. Экспертная оценка, выполненная Техническим международным комитетом по тепловым насосам, показала, что основным типом намечаемых к внедрению систем являются компрессионные.

В *компрессионном* ТН компрессор засасывает из испарителя легкокипящие пары рабочего вещества, например фреона, и сжимает их. Сжатие сопровождается увеличением температуры и давления паров. Сжатые пары поступают в конденсатор, где отдают тепло другому теплоносителю, например воде, используемой далее в системе горячего водоснабжения. Поскольку температура конденсации сжатого газа выше, чем кипения рабочего тела при обычном давлении, то через регулирующийся вентиль конденсат подают в испаритель. Таким образом, работа теплового насоса непрерывно воспроизводится.

Показано, что эффективность применения ТН в периодических процессах выше, чем в непрерывных [14].

В качестве источника НПТ в тепловых насосах могут применяться вытяжной воздух, отработанная вода системы горячего водоснабжения, промышленная и бытовая. Извлеченная теплота передается воде (водо-водяные ТН) или воздуху (воздушные или воздухо-воздушные ТН). Например, в системах отопления и вентиляции широко представлены воздухо-воздушные тепловые насосы.

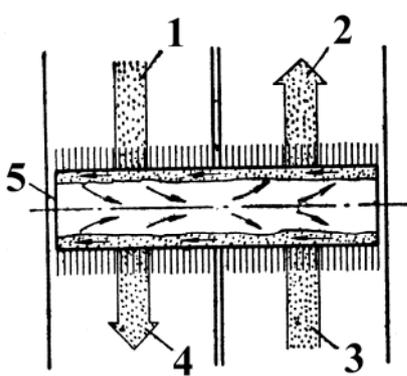
Теплоту низкотемпературных газов эффективно утилизируют также в *экономайзерах*. К ним относятся устройства для подогрева воды (перед впуском в ко-

тел котельной установки) или воздуха (перед подачей в топку), использующие теплоту конденсации дымовых газов, выходящих из топки парового котла и охлаждаемых ниже температуры точки росы. Для этого применяются специальные конструкции: поверхностные и контактные экономайзеры. Они повышают степень регенерации отходящих газов, особенно высоковлажных, на 20-40%.

В системах кондиционирования воздуха и вентиляции возможна утилизация теплоты вентиляционных выбросов в различных типах теплообменников, например вращающихся регенеративных и с промежуточным теплоносителем.

В СССР была разработана обширная номенклатура регенеративных теплообменников с производительностью до 125 тыс. м<sup>3</sup>/ч. Использование теплоты вентиляционных выбросов в них составляет 70-75%.

К теплообменникам с промежуточным теплоносителем относятся, в частности, *тепловые трубы* (ТТ). Как следует из рисунка, отходящие газы омывают горячий



**Схема тепловой трубы:**

1 – подвод отходящих газов;  
2 – отвод подогретого воздуха;  
3 – подвод воздуха; 4 – отвод отходящих газов; 5 – тепловая труба

конец тепловой трубы и испаряют находящуюся здесь жидкость, например даутерм. Ее пары проходят к холодному концу трубы, где отдают теплоту нагреваемой среде, например воздуху, охлаждаются и конденсируются. Конденсат попадает в кольцевой зазор, заполненный пористой массой с капиллярной структурой. Она представляет собой фитили, металловолоконистые или другие наполнители. Силы капиллярного давления, возникающие в этой массе при заполнении ее жидкостью, возвращают конденсат в зону нагрева. Работа трубы не зависит от сил гравитации, что позволяет располагать ее в любом положении.

Тепловые трубы могут существенно различаться по формам и габаритам. Их внутренний диаметр варьирует от нескольких миллиметров до 10-15 см при длине 2-3 м.

Тепловые трубы можно монтировать в пучки с необходимой поверхностью нагрева. Так, в Японии разработаны установки, использующие теплоту отходящих газов доменных воздуходогревателей для подогрева воздуха, поступающего в их горелки. При температуре газов 230°С воздух прогревается до 180°С.

Другими, помимо металлургии, областями применения ТТ являются энергетика, машиностроение, электроника, химическая промышленность, сельское хозяйство. Наиболее востребованы они при температурах ВЭР  $-50+250^{\circ}\text{C}$ , так как в данном интервале их эксплуатации не требуется дорогостоящих материалов и теплоносителей.

Теплоту низкотемпературных ВЭР можно эффективно использовать и для получения холода.

В отличие от теплового насоса, которым теплота отбирается от теплоносителя и переносится на более высокий температурный уровень, в *холодильной установке* производится отъем теплоты в холодильной камере и выброс ее в окружающую среду.

Холодильные установки сглаживают сезонную неравномерность применения ВЭР, поскольку в летнее время снижение расхода теплоты на нужды теплофикации компенсируется увеличением потребности в холоде. Последний производится в виде охлажденной воды с температурой  $5-7^{\circ}\text{C}$ . Для его получения используются незапыленные отходящие газы с температурой  $300^{\circ}\text{C}$ , пар давлением  $0,13-0,15$  МПа, горячая вода с температурой  $130^{\circ}\text{C}$ .

## 6. Эффективность использования

Практика проектирования и экономического обоснования эффективности утилизационных установок, их фактическая эксплуатация показывают, что они дают большой экономический эффект. Так, себестоимость «бестопливного» пара, вырабатываемого в котлах-утилизаторах, почти в два раза ниже, чем пара аналогичных параметров от котлов заводских ТЭЦ. Эффективность капитальных вложений в производство энергии при использовании ВЭР в 2-3 раза выше, чем в топливно-энергетическом комплексе промышленности.

Таким образом, важнейшим результатом применения ВЭР является экономия первичного топлива, которая в основном определяет величину получаемого экономического эффекта.

Эффективность вовлечения ВЭР резко повышается при многоступенчатой схеме утилизации тепловых выбросов. Примером такого «комплексного» исполь-

зования теплоты природного газа является кузнечно-штамповочное производство Донецкого экскаваторного завода [15]. Применяемая на нем схема сводится к следующему. Продукты сгорания после кольцевой печи поступают в многофункциональный блочный теплообменник. В его первом модуле производится подогрев воды, используемой на технологические и хозяйственные нужды. Следующие две ступени представляют собой рекуператор, в котором нагревают воздух, подаваемый на горение топлива, до 340°C. Четвертая ступень – нагреватель сжатого воздуха, поступающего на пневмомолоты. После блочного теплообменника продукты сгорания при 200-210°C направляют в контактный экономайзер, а затем при температуре 55-60°C – в дымовую трубу. Использование рассмотренной схемы повышает КПД с 18% (кольцевая печь) до 92%.

Эффективность вовлечения ВЭР также повышается за счет увеличения числа потребителей НПТ при теплофикации прилегающих к предприятиям промышленных узлов и жилых районов. При этом улучшается и экологическая обстановка при закрытии мелких, без пылегазоулавливающих устройств, котельных, загрязняющих окружающую среду.

Вместе с тем расширение применения ВЭР, как и другие направления рационального использования сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, требуют внедрения новой техники и прогрессивной технологии, что связано с дополнительными капитальными затратами, особенно остродефицитными в настоящее время.

Поэтому значительная часть вторичных энергетических ресурсов либо вообще не востребована, поскольку не найдены надежные технические решения их применения, например физической теплоты литейного чугуна, нагретого металла различных прокатных станов, либо утилизируется недостаточно (химическая энергия конвертерного газа, физическая теплота жидких шлаков, зол и др.). Эффективность ВЭР снижается также из-за сезонного характера потребления пара низких параметров и иных причин неполного использования действующих установок утилизации энергетических выбросов промышленных технологий.

Очевидно, что качественный и количественный рост эффективности потребления ВЭР напрямую связан с проблемой общего возрождения народного хозяйства России, что в обозримом будущем представляется маловероятным. Действи-

тельно, в течение последних 10 лет наша страна реализует скудный, на уровне 20% в сравнении с 1980-1990 гг., объем инвестиций в народное хозяйство. На такой незначительной инновационной основе устойчивый рост экономики невозможен, в том числе и решение более частной задачи – эффективной утилизации вторичных энергетических ресурсов.

01.02.2003

### Литература

1. Методика определения выхода и экономической эффективности использования побочных (вторичных) энергетических ресурсов. – М.: ГКНТ СССР, АН СССР, Госплан СССР, 1972. – 40 с.
2. **Вяткин М.А.** Вторичные энергетические ресурсы промышленности. – М.: Всесоюз. заоч. политех. ин-т, 1986. – 44 с.
3. **Лотош В.Е.** Технологии основных производств в природопользовании, 3 изд. – Екатеринбург: изд-во УрГУПС, 2002. – 553 с.
4. **Розенгарт Ю.И., Якобсон Б.И., Мурадова З.А.** Вторичные энергетические ресурсы черной металлургии и их использование. – Киев: Выща шк., 1988. – 328 с.
5. **Schüphaus K.** Cleaning of coke-oven gas for use as fuel // Steel Times. – 1997. – 225. – № 5. – P. 186, 188.
6. Комплексное использование сырья и отходов / **Б.М.Равич, В.П.Окладников, В.Н.Лыгач, М.А.Менковский.** – М.: Химия, 1988. – 288 с.
7. Вторичные материальные ресурсы черной металлургии. Справ.: В 2 т. / Под ред. Л.А.Смирнова. – М.: Экономика, 1986. – Т.2. – 344 с.
8. **Buchanenko H.G.** Spezial-Abhitzekessel für Olympic Dam // Erzmetall. – 1999. – 52. – № 10. – S. 555-556.
9. Вторичные теплоэнергоресурсы и охрана окружающей среды / **В.В.Харитонов, В.А.Голубев, В.М.Овчинников, В.Л.Лиходиевский.** – Минск: Высшая шк., 1988. – 171 с.

10. **Безруких П.П.** Нетрадиционная энергетика // Рос. хим. журн. – 1997. – № 6. – С. 82-91.
11. **Baatz E., Heidt G.** Erstes abwärmekraftwerk nach dem organic-rankine-cycle-verfahren für die restnutzung der Klinkerkühlerabuft // Zement-Kalk-Gips int. – 2000. – 53. – № 8. – S. 425-436.
12. Эффективность цикла Ранкина // Цемент и его примен. – 1999. – № 5-6. – С. 6.
13. Waste-to-energy plant will get a power lift from ammonia // Chem. Eng. (USA). – 1997. – 104. – № 3. – P. 17.
14. **Захаров М.К.** Сравнительная оценка эффективности применения тепловых насосов в периодических и непрерывных процессах // Хим. пром-сть. – 2002. – № 2. – С. 3-19.
15. Новгородский Е.Е., Диттбернер Е.В. Снижение CO<sub>2</sub>-эмиссий в промышленности // Изв. Акад. пром. экологии. – 2002. – № 4. – С. 56-58.