

Использование газовых и энергетических выбросов промышленных технологий

14.1. Основные направления утилизации

В ряде предыдущих разделов (9.6; 11.4; 12.1; 13.1 и др.) рассматривалась проблема использования газов, образующихся в утилизационных технологиях. Вместе с тем основное количество газообразных отходов выделяется в разнообразных промышленных технологиях, являясь основным загрязнителем атмосферы, а также почв и водного бассейна. Состав этих газов, их количество, влияние на окружающую среду, другие характеристики, как правило, освещались при описании основных производственных процессов, методов пыле- и газоочистки (Кн. 1, Кн. 2).

Напомним, что к наиболее массовым загрязнителям, входящим в состав отходящих газов, относятся диоксид серы SO_2 , оксиды азота NO_x , оксид CO и диоксид (CO_2) углерода. Их выбросы имеют место, например, во всех пределах, где сжигают твердое, жидкое или газообразное топливо. В технологических выбросах присутствуют, иногда в значительных количествах, и другие соединения: сероводород H_2S , сероуглерод CS_2 , аммиак NH_3 , цианистый водород HCN , цианиды, ароматические соединения (бензол и углеводороды бензольного ряда, бенз(а)пирен, фенолы и пр.), фтористые, хлористые соединения и т.д.

Однако так же, как твердые и жидкие, газообразные отходы не только загрязняют окружающую среду, но и в ряде случаев используются. Их утилизация осуществляется в двух направлениях:

переработка с получением химических веществ, в том числе в виде товарной продукции (серная кислота, сера, безводный аммиак, аммиачная вода, сульфаты и фосфаты аммония, лекарственные вещества, парфюмерия и т.п.);

применение в качестве вторичных энергетических ресурсов. К ВЭР относится также ряд других низкопотенциальных источников тепла.

Рассмотрим эти направления применительно к наиболее крупнотоннажным производствам.

14.2. Переработка газов

14.2.1. Сернистые

14.2.1.1. Основные источники и характер выбросов

Под сернистыми обычно подразумевают газы, содержащие диоксид серы (сернистый ангидрид). Этот компонент является одним из наиболее массовых технологических загрязнителей, ежегодные выбросы которого в мире, по некоторым оценкам, достигают 150 млн т.

Значительную массу диоксида серы содержат газы сжигания серосодержащих топлив (мазута и угля) в энергетических и технологических установках. Его концентрация в этих газах пропорциональна содержанию серы в топливе и составляет обычно 0,15-0,30%.

Столь же значительным источником загрязнения атмосферы являются предприятия металлургической промышленности, в первую очередь цветной металлургии. Мощность даже единичных источников выбросов SO_2 , например медеплавильных заводов, может достигать несколько миллионов тонн в год.

В последнее время в связи с интенсификацией производства и созданием новых пирометаллургических процессов, использующих кислородное и обогащенное кислородом дутье, увеличивается доля отходящих газов с концентрациями диоксида серы 8-12% и более высокими, вплоть до 70% в цветной металлургии.

В зависимости от содержания сернистого ангидрида в газах, их разделяют на низкоконцентрированные и концентрированные.

К низкоконцентрированным относят газы с содержанием не более 4% SO_2 . Это топочные (энергетических и других установок) и выбросные газы металлургических, химических и других производств. На них приходится подавляющее количество диоксида серы. Однако их утилизация встречает экономические трудности. Для эффективного производства наиболее доступного товарного продукта (серной кислоты) концентрация SO_2 в этих газах недостаточна.

Следует отметить, что в металлургии иногда «укрепляют» слабые газы примерно до 4% по SO_2 за счет сжигания серы, серосодержащего сырья или смешения с более богатыми по сернистому ангидриду объемами. Однако такой подход считают оправданным только для производства серной кислоты, потребляемой на «месте» (на самом предприятии или в прилегающих к нему районах).

Обязательным условием эффективной переработки только низкоконцентрированных сернистых газов является их улавливание с последую-

щим выделением в отдельную фазу, в которой их содержание достаточно для экономически оправданной утилизации в товарный продукт.

В свою очередь, в случае использования концентрированных газов их иногда разубоживают до содержания диоксида серы порядка 7-8%, оптимального для получения серной кислоты.

14.2.1.2. Низкоконцентрированные

В настоящее время для улавливания низкоконцентрированного сернистого ангидрида применяют, как правило, химические и физико-химические методы.

Известно несколько промышленно освоенных *химических* способов утилизации диоксида серы. В частности, как кислотный оксид он достаточно полно может быть уловлен раствором любого основания, особенно щелочного (известкового и известнякового молока). Используют также оксиды металлов, растворы кислот, ароматических аминов, сульфит-бисульфитные поглотители и др.

Известковые и аналогичные им известняковые методы основаны на химическом взаимодействии SO_2 с известью $\text{Ca}(\text{OH})_2$ или с известняком CaCO_3 . При этом образуется сульфит кальция CaSO_3 , который окисляют до сульфата или гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Процесс проводится с использованием известковой пульпы, окисление CaSO_3 осуществляют при 350-500°C в аппаратах с кипящим слоем, вводя в качестве дополнительного окислителя пиролюзит MnO_2 или пиролюзитовую руду. Пульпу в ходе очистки при контакте с дымовыми газами можно доводить до сухого продукта (так называемый полусухой метод в отличие от мокрого).

В Японии и США из шламов известковой сероочистки производят товарный гипс, окисляя сульфит кальция в сульфат воздухом при повышенных давлениях и получая продукт с содержанием до 95% $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

В некоторых случаях в США известковый шлам утилизируют, смешивая с золой и добавками. Высушенная смесь стабильна, инертна и находит применение в дорожном строительстве.

К известково-известняковым методам близки процессы, в которых для обессеривания газов используют суспензии летучей золы с повышенным отношением $\text{CaO}_{\text{св}}/\text{SO}_2$. Совмещение процессов очистки топочных газов от летучей золы и SO_2 снижает эксплуатационные затраты.

Недостаток известковых и известняковых методов состоит в переходе извести и сернистого ангидрида в продукты, не находящие достаточного сбыта. Производство самой извести является экологически

грязным (большой расход топлива, образование мелкодисперсной пыли с ярко выраженными щелочными свойствами).

В ряде методов в качестве реагентов используют пульпу оксидов металлов (магния, цинка и др.) с образованием сульфитов. Их разлагают при 200-400°C с выделением сернистого ангидрида или нагревают в присутствии угля и водяного пара. В последнем случае образуются оксид металла и сероводород:



Часто проводят и тот и другой процессы, а газы (SO_2 и H_2S) смешивают для проведения реакции Клауса (разд. 14.2.1.3).

Представление о технологии сероочистки низкоконцентрированных газов с применением оксидов металла дает схема с использованием оксида магния. В этом случае дымовые газы орошаются циркулирующей суспензией в скруббере Вентури. Ее состав, %: 1,4 MgO ; 6,7 MgSO_3 ; 12,4 MgSO_4 ; 79,5 воды и примесей. Образование сульфата нежелательно, так как он разлагается при высокой температуре (1200-1300°C). Во избежание этого вводят ингибиторы окисления или выполняют процесс при малом времени контакта фаз.

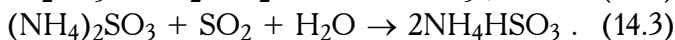
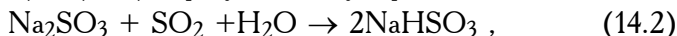
Из нейтрализатора суспензия поступает на центрифугу для выделения малорастворимых кристаллогидратов сульфата магния. Выделенный остаток после сушки в барабанных печах содержит преимущественно MgSO_3 и MgSO_4 (соответственно 65 и 11,8%). Его направляют на прокалку при 800-900°C (температура газовой фазы) в печах кипящего слоя или вращающихся. Газ, содержащий 7-15% SO_2 , охлаждают, очищают от пыли и направляют на получение серной кислоты. Твердый остаток из печи (86,1% MgO и 8,4% MgSO_4) также охлаждают и направляют в голову процесса (*Утилизация...* 1994 г.).

Преимущества применения оксида магния: возможность очистки горячих газов без их предварительного охлаждения; доступность, возвратность и дешевизна используемого материала. Метод пригоден для извлечения SO_2 из отходящих газов энергетических и технологических, например агломерационных, установок.

Улавливание сернистого ангидрида *серной кислотой* производят в присутствии окислителя (пирролюзитовой руды), барботируя газ через ее слабый раствор. Таким образом можно получить серную кислоту концентрацией до 20-25%. Расход пирролюзита на 1 т уловленного SO_2 составляет 15 кг при степени очистки газа 75-85%.

Сульфит-бисульфитные методы частично рассмотрены в кн. 2 (разд. 3.4.3.1), но здесь информация обширнее. Эти методы позволяют перерабатывать извлекаемый компонент в серную кислоту, элементарную серу, сжиженный диоксид серы и сульфаты. Чаще всего для извлечения SO_2 используют сульфиты натрия и аммония, позволяю-

щие очищать газы с любым содержанием сернистого ангидрида. При его поглощении сульфитными растворами при 35-45°C в соответствии с реакциями (14.2) и (14.3) образуются бисульфиты:



Растворы регенерируют, нагревая их до кипения.

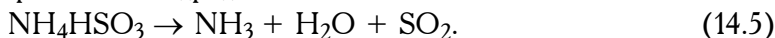
При нагревании бисульфита натрия образуются сернистый ангидрид и сульфит натрия:



После конденсации водяных паров сернистый ангидрид содержит до 90% SO_2 . Из него можно получить либо серу по методу Клауса, либо серную кислоту, предварительно доокислив сернистый ангидрид до серного на катализаторе.

Сульфит натрия регенерируется не полностью вследствие его частичного превращения в сульфат Na_2SO_4 и гипосульфит $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$.

Регенерацию сульфита аммония и выделение сернистого газа проводят при 150°C в распылительной сушилке или в выпарном аппарате. В последнем случае реагент регенерируют паром при 90°C и остаточном давлении ~0,07 МПа. При этом сульфит разлагается на аммиак, воду и сернистый ангидрид



До 10% сульфита в ходе очистки превращается в сульфат аммония, который выводится в виде побочного продукта и может быть использован как удобрение или переработан на гипс при добавлении суспензии известкового молока.

Сульфит-бисульфитные методы позволяют очистить газы до концентрации 0,02% SO_2 . При начальной концентрации 3% SO_2 на 1 т уловленного сернистого ангидрида расходуется порядка 4 т пара, 125 м³ воды и 70 кг аммиака. При исходной концентрации SO_2 на уровне 0,3% расходные коэффициенты возрастают в 1,5-2,5 раза.

Наибольшее распространение из перечисленных при очистке отходящих газов ТЭС, работающих на угле, получили способы мокрого и полусухого улавливания SO_2 .

За рубежом первые установки очистки газов от SO_2 появились в 60-е гг. 20 в. Однако уже в 1988-1992 гг. они функционировали в Германии (на ТЭС суммарной мощностью 35 ГВт), США (50 ГВт), Японии (45 ГВт). Особенно часто используют мокрые методы с применением извести, известняка и сульфит-бисульфитный-натриевый. В частности, в Германии доля установок мокрого обессеривания превышает 90%, на 95% из них практикуют известь и известняк. Улавливание SO_2 суспензией $\text{Ca}(\text{OH})_2$ внедрено также на более чем

150 ТЭС США. Она обеспечивает более высокое качество образующегося при сероулавливании гипса, который может быть использован в строительстве. Однако ее производство, в свою очередь, является экологически грязным процессом.

Схема переработки гипса, продукта мокрого способа сероулавливания, включает реактор для регулирования рН сточных вод установки обессеривания дымовых газов, отстойник-осветлитель, аэратор, фильтр-пресс. Для повышения степени обезвоживания осадка вводится хлорное железо FeCl_3 и катионитовые полимеры. Влажность осадка после обезвоживания составляет 45-50% (Mierzejewski).

На сравнительно небольших топочных установках электростанций и заводов по сжиганию мусора более целесообразно применение технологии полусухого обессеривания, обеспечивающей такую же степень очистки, как и мокрый способ, при меньших капитальных затратах, чем в системе влажной обработки. В качестве одного из улавливающих компонентов в данном варианте наряду с известью можно использовать топливные золы (Weiler).

Из физико-химических методов улавливания SO_2 с последующей его утилизацией применяют абсорбционные, адсорбционные и радиационно-химические.

Из абсорбционных технологий за рубежом при концентрации SO_2 в отходящих газах 1-2% внедрены на основе ароматических аминов, т.е. класса органических соединений, представляющих собой продукты замещения в аммиаке атомов водорода углеводородными радикалами.

В процессе «Сульфидин» фирмы «Лурги» (Германия) используется смесь воды с одним из аминов (ксилидином) при их соотношении 1:1. В общем случае вода и ксилидин не смешиваются, но при взаимодействии SO_2 с последним образуется определенное количество ксилидин-сульфата, растворимого в воде:



При концентрации SO_2 , близкой к 100 г/л, смесь становится гомогенной.

Очищаемый газ последовательно проходит через два абсорбера, при этом концентрация SO_2 в нем снижается до 0,05-0,1%. Пары ксилидина, выносимые из абсорберов, рекуперировать 5-10%-й серной кислотой в промывной колонне. К насыщенному абсорбенту, содержащему 130-180 г/л SO_2 , добавляют раствор соды и направляют его в отпарную колонну, где он нагревается до 95-100°C паром. Десорбированный сернистый газ, содержащий небольшие количества ксилидина, после промывания водой поступает на дальнейшую переработку, например для получения серной кислоты.

При концентрации SO_2 свыше 3,5% более эффективным, чем ксилидин, является диметиланилин. В частности, в процессе АСАРКО (США) им орошают газ, очищенный от твердых примесей. После абсорбции диоксида серы отходящие газы промывают раствором соды для удаления следов SO_2 и оросителя, а затем разбавленной серной кислотой. Десорбцию сернистого ангидрида проводят в отпарной колонне. Выделяющийся из нее газ поступает в скруббер для рекуперации диметиланилина, а затем на дальнейшее использование, например при производстве серной кислоты. В целом процесс АСАРКО имеет меньшие по сравнению с технологией «Сульфидин» потери абсорбента и расход греющего пара.

Следует отметить, что оба рассмотренных метода считают мало перспективными для черной металлургии с ее весьма значительными объемами отходящих газов и относительно низкими концентрациями SO_2 . Однако в цветной металлургии ксилидин и диметиланилин для очистки серосодержащих газов начали внедрять еще до второй мировой войны (*Комплексная...*).

Адсорбционные методы в основном предполагают использование твердых сорбентов, работающих в режиме физической адсорбции или хемосорбции.

В промышленных масштабах опробованы углеродные сорбенты (в основном активированные угли и полукоксы), силикагели, иониты и цеолиты. Наиболее перспективное (углеадсорбционное) извлечение осуществляется с применением стационарного или движущегося слоя сорбентов. Установки такого рода имеют эффективность очистки, равную 90-95%, довольно высокое гидравлическое сопротивление (до 6,0 кПа), могут очищать газы с содержанием 20 г/м³ и более золы.

Для регенерации насыщенных растворителей используют *термический* и *экстракционный* способы.

В первом случае адсорбент нагревают газовым или твердым теплоносителем до 400-450°C и эвакуируют продукты десорбции определенным количеством отдувочного агента. Это обеспечивает получение газов десорбции, содержащих до 40-50% SO_2 . Их направляют для производства серной кислоты, элементарной серы и жидкого сернистого ангидрида.

Экстракционная технология состоит в обработке поглотителя подогретой водой. При этом выдают 10-15%-ю серную кислоту, которую перед реализацией сторонним потребителям концентрируют упариванием.

Широкое внедрение адсорбционных методов сероочистки сдерживается повышенными капитальными и эксплуатационными затратами. Это обусловлено, в частности, применением дорогостоящих специальных материалов для изготовления адсорбционно-десорбционной аппаратуры и значительными затратами тепла на регенерацию.

Радиационно-химические методы очистки относятся к числу новых физико-химических процессов, разрабатываемых в нашей стране и за рубежом (Кн.2, разд. 3.4.2.3). Отметим вновь, что в их основе лежит воздействие на выбросы потоком ускоренных электронов. Как следствие, в них образуются валентно-ненасыщенные возбужденные частицы с положительными или отрицательными зарядами (ионы, радикалы), обладающие повышенной химической активностью. Под их воздействием в газах происходит *радиолиз* токсичных элементов, т.е. их химические превращения. Продукты радиолиза нетоксичны.

Рассмотрение различных процессов, пригодных для утилизации бедных по сере газов, не позволяет отдать предпочтение какому-либо из них. Выбор того или иного способа зависит от местных технико-экономических условий, масштабов производства, содержания сернистого ангидрида в газах, условий сбыта побочных продуктов процесса и пр.

В целом стоимость сероулавливающих установок в настоящее время составляет 22-26% от капитальных вложений в тепловые электростанции, являющиеся наиболее мощным источником выделения бедных сернистых газов.

14.2.1.3. Концентрированные

К концентрированным относят сернистые газы, содержащие более 4,0% SO_2 . Их основной источник — предприятия цветной металлургии, прежде всего свинцово-цинковой и медеплавильной подотраслей. Здесь уже в течение продолжительного периода из концентрированных газов получают серную кислоту, жидкий серный ангидрид SO_3 и элементарную серу.

Необходимо отметить, что при получении серной кислоты на медеплавильных заводах газы отражательных печей, содержащие не более 1-2% SO_2 , практически не используются. Нужно также учитывать периодичность работы конвертеров, что создает трудности в организации устойчивого газоснабжения сернокислотных установок и вызывает необходимость выброса части газов в трубу. Поэтому газы конвертеров как самостоятельный источник SO_2 практически не применяются. В СССР исключение составлял Алавердский медеплавильный завод (Армения).

Утилизация конвертерных газов наиболее целесообразна при смешении их с богатыми газами, например кислородно-факельной плавки (65-75% SO_2) или обжига, особенно в кипящем слое (10-12% SO_2). В этом случае концентрация сернистого ангидрида в смеси оптимальна для производства серной кислоты, составляя 6-8%. В одних конвертерных газах из-за подсосов у напыльника и в газоходах, даже при герметизации их, она не намного выше 4,5%.

Переработку концентрированных по диоксиду серы газов с получением серной кислоты осуществляют по наиболее распространенной (контактной) схеме (Кн. 1). При этом основные технико-экономические показатели ее производства существенно улучшаются при увеличении концентрации сернистого ангидрида (табл. 14.1).

Таблица 14.1

Технико-экономические показатели получения серной кислоты контактным способом (Комплексная...)

Относительные показатели, %	Содержание SO ₂ , %	
	8	4
Цеховая себестоимость:	100	112
В том числе стоимость переработки	100	158
Капитальные затраты	100	152
Объем зданий на единицу мощности	100	228

Поэтому естественно, что технический прогресс в вопросах очистки металлургических газов от соединений серы с выпуском серной кислоты в значительной степени связан с применением кислорода в технологических процессах. Использование последнего обеспечивает получение газов с повышенным содержанием SO₂; позволяет утилизировать все газы для производства серной кислоты, серы и других продуктов; увеличивает степень извлечения серы и сокращает выбросы ее диоксида непосредственно в сернокислотном производстве.

Одним из таких процессов является кислородная взвешенная циклонная электротермическая плавка, или КИВЦЭТ, применяемая в свинцово-цинковой промышленности. Использование в ней технического кислорода сокращает общее количество отходящих газов с повышением в них концентрации сернистого ангидрида. Это приводит к технически эффективному и экономически рентабельному последующему выделению серы в виде серной кислоты.

При взвешенной плавке медной шихты на техническом кислороде, по данным завода Коппер-Клифф, отходящие газы содержат 50-60% SO₂. Их компримируют для получения жидкого сернистого ангидрида.

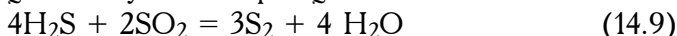
Перед компримированием газы при температуре 1260°C поступают в пылеосадительную камеру, затем дополнительно охлаждаются до 650°C и очищаются от грубой пыли в металлической пылевой камере. Далее в скрубберах они охлаждаются до 40°C и от них отмывается пыль, которая, как и водяной туман, осаждается в циклоне. Наконец, тонкая пыль и туман H₂SO₄ улавливаются в мокром электрофилт্রে. Окончательно очищенный, охлажденный и осушенный серной кислотой газ дважды

подвергается сжижению компримированием. Остающийся после второй конденсации газ направляют на производство серной кислоты.

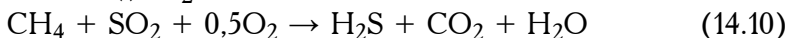
В СНГ газы с высоким (20-65%) содержанием SO_2 образуются, в частности, в процессе Ванюкова, или при плавке в жидкой ванне. Большая часть таких производств составляет единый комплекс с сернокислотным цехом (например, Балхашский и Среднеуральский медеплавильные комбинаты). Вместе с тем на Норильском горно-металлургическом комбинате газы ПЖВ используют для выпуска элементарной серы по метановому способу (процесс Клауса). При этом от одной печи Ванюкова получают до 60 тыс. т/год элементарной серы (извлечение 80%) и до 80 т/год пара (Развитие...).

В этом способе продукт получают в твердом виде. Он занимает гораздо меньшие объемы в сравнении с эквивалентными количествами серосодержащих газов, с минимальными затратами может быть доставлен потребителю на значительные расстояния.

В основе процесса Клауса лежит реакция:



В соответствии с нею, соотношение $\text{H}_2\text{S}:\text{SO}_2$ равно 2. Для его поддержания оказалось более технологичным вначале SO_2 метаном восстанавливать до H_2S :



Затем $1/3$ образовавшегося сероводорода вновь окисляют до SO_2 , получая в смеси соотношение $\text{H}_2\text{S}:\text{SO}_2$, отвечающее реакции (14.9).

Продукт процесса — элементарная сера — имеет невысокие температуры кипения ($444,6^\circ\text{C}$), плавления ($112,8^\circ\text{C}$) и плотность $2,07\text{ г/см}^3$. Это позволяет довольно легко выделить серу из газов вначале в жидком, а затем и в кристаллическом состоянии.

Реакции Клауса мешает присутствие значительных количеств углекислого газа и кислорода. Первый адсорбируют щелочными растворами, кислород поглощают монометаноламином или другими адсорбентами в присутствии катализаторов на основе оксидов металлов (Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Al) и оксида кремния.

Процесс экономически целесообразен при концентрации SO_2 в дымовых газах, равной или большей 2% (Еремин). Уже в 80-е гг. 20 в. в мире на установках Клауса производили более 20 млн т/год элементарной серы. В зависимости от числа каталитических реакторов, степень превращения сероводорода в серу достигает 96-99%.

Другим вариантом получения элементарной серы является медно-серная шахтная плавка. Известно ее использование в течение длительного времени на Медногорском медно-серном комбинате (Оренбургская обл.) и на заводах Испании и Португалии. Следует отметить, что

она применима для переработки только чистых пиритных руд, содержащих свыше 75% FeS_2 , небольшое количество легкоплавкой пустой породы, цинка и мышьяка. Наличие последнего делает невозможным использование в процессе катализатора, необходимого для повышения выхода элементарной серы. Присутствие цинка ведет к настылеобразованию на колошнике шахтной печи.

Не останавливаясь на описании всего процесса медно-серной плавки, отметим, что колошниковые газы содержат, г/м^3 : 200-220 S_2 ; 30-35 $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{S}$; 4,4-5,0 COS ; 8,2-16 CS_2 ; 15-50 пыли. Газы практически не должны иметь кислорода во избежание окисления паров элементарной серы. Этого достигают герметизацией колошника и особым устройством загрузочного узла, исключающего попадание воздуха в печь при подаче в нее шихтовых материалов.

Газы выходят из печи при сравнительно высокой температуре (430-450°C), что обеспечивает их очистку от пыли до начала конденсации паров серы. Они вводятся в газосборник, обеспечивающий усреднение их состава. В нем и газоходах осаждается наиболее крупная пыль, окончательная очистка от нее происходит в электрофильтрах.

Очищенный газ подается в контактные камеры, заполненные пористой массой катализатора, состоящего из глиноземистого цемента и гидроксида алюминия. Здесь при температуре около 450°C между SO_2 , CS_2 , H_2S и COS газовой смеси протекают взаимодействия с образованием паров элементарной серы, в том числе по реакции (14.9).

Из контактных камер газ направляют под водотрубные котлы. При его охлаждении сера конденсируется на трубках и стекает в сборник. Выделяющееся тепло используется для получения пара низкого давления.

При конденсации газ охлаждается до ~120°C. Для улавливания взвешенных в нем капель серы применяют оросительные башни. В них газ подается снизу навстречу стекающей по насадке расплавленной сере.

В контактной камере и оросительных башнях удается извлечь только часть серы, поэтому газ вновь подогревают до 450°C и направляют во вторую аналогичную цепь аппаратов.

Для обезвреживания отработанных газов, в которых еще остаются небольшие количества H_2S и тонкие частицы серы, служат насадочные башни, орошаемые известковым молоком. После них газы выбрасывают в трубу.

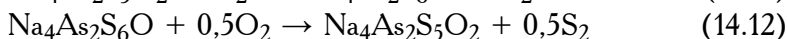
Жидкую серу для очистки от мышьяка смешивают в барабане с горячим известковым молоком. Ее чистота доводится до 99,9% при содержании мышьяка примерно 0,01%. Очищенная сера разливается в деревянные формы и отгружается потребителю в кусках.

В целом при медно-серной плавке в элементарную серу переходит до 68% S.

14.2.2. Сероводородные

Для очистки газов от сероводорода с последующим его использованием практикуют такие же методы, как и для сернистых газов: химические и физико-химические. Первые более производительны, экономичны и применяются значительно чаще.

К группе химических методов относится широко распространенное улавливание сероводорода мышьяково-щелочными растворами (процесс Джамарко-Ветроукока). Оно основано на окислении H_2S до элементарной серы при протекании двух последовательных реакций (14.11) и (14.12).



Реакция (14.12) реализуется при продувке раствора воздухом и служит для его регенерации.

Схема мышьяково-щелочной очистки, применительно к коксовому газу представленная на рис. 14.1, позволяет извлекать H_2S на 90-95%.

К преимуществам рассматриваемого метода относят высокую степень извлечения серы и легкость регенерации раствора. Недостаток способа — токсичность используемого реагента.

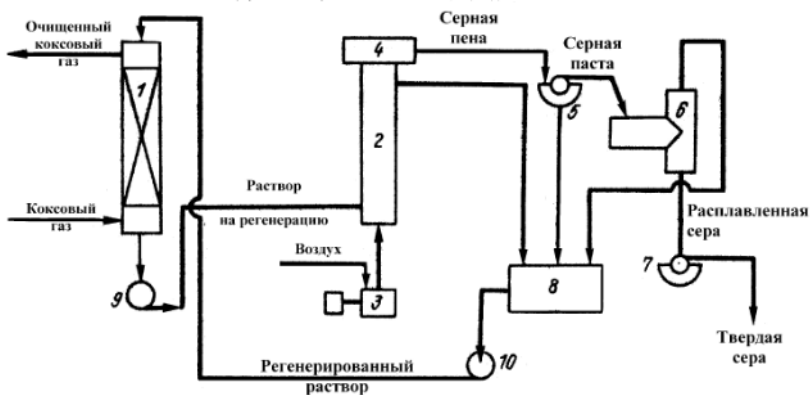


Рис. 14.1. Технологическая схема

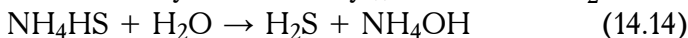
мышьяково-щелочной очистки газа от сероводорода:

- 1 — абсорбер; 2 — регенератор; 3 — компрессор; 4 — пеносборник;
5 — вакуум-фильтр; 6 — автоклав-плавильник; 7 — барабанный охладитель; 8 — сборник регенерированного раствора; 9, 10 — насосы

В мировой практике распространена также *аммиачная сероочистка*. Газ теряет H_2S в тарельчатом (насадочном) или форсуночном скруббере, промываемом аммиачной водой:



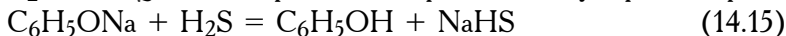
Затем он направляется на очистку от аммиака, а раствор бисульфида аммония подогревается и поступает в колонну для извлечения H_2S :



Сероводород подается на переработку, а аммиачная вода после охлаждения возвращается в голову процесса.

К достоинствам аммиачной сероочистки относятся отсутствие дорогостоящих реактивов, небольшой расход пара и электроэнергии. Однако для нее требуется аппаратура, изготовленная из специальных сплавов.

Для извлечения сероводорода используют также растворы фенолята натрия. Очистка в *фенолятном*, как и в аммиачном, растворе носит циклический характер, с регенерацией раствора. При обычной температуре H_2S поглощается с образованием фенола и бисульфида натрия:



При нагревании раствора процесс идет в обратном направлении, с выделением концентрированного сероводорода, который может быть превращен в элементарную серу, например по реакции Клауса.

Из физико-химических способов извлечения H_2S прежде всего следует отметить адсорбционные, основанные на применении активированных углей. Использование последних предполагает обязательное присутствие в газе кислорода. Его наличие обеспечивает окисление H_2S с образованием элементарной серы и серной кислоты:



Экзотермичность этих реакций может приводить к сильному разогреву слоя поглотителя вплоть до его возгорания. В связи с этим сероочистке активированным углем подвергают обычно газы, содержащие не более $5 \text{ г/м}^3 \text{ H}_2\text{S}$. Процесс осуществляют в кипящем слое. Регенерацию насыщенных углей часто проводят раствором сульфида аммония с образованием раствора полисульфида аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_n$. Последний обрабатывают острым паром при $125\text{-}130^\circ\text{C}$ под давлением $1,6\text{-}1,9 \text{ кПа}$, десорбируя серу.

Эффективными поглотителями H_2S являются также синтетические цеолиты (NaA , CaA , NaX). Помимо большой сорбционной емкости, они обладают высокой селективностью извлечения H_2S , в частности при одновременном присутствии CO_2 . Однако эти материалы дороги, что ограничивает их применение для этих целей.

14.2.3. Аммиачные, углеродсодержащие и другие

Аммиак и другие азотистые соединения (HCN, пиридиновые основания и т.п.) в наибольших количествах присутствуют в газообразных выбросах коксовых и химических цехов предприятий черной металлургии и основной химии.

Необходимость удаления NH_3 обусловлена тем, что он совместно с цианистым водородом усиливает коррозию оборудования, а при сжигании образует NO_x . Присутствие аммиака усложняет также очистку коксового газа от бензолных соединений.

Улавливание пиридиновых оснований, содержание которых в коксовом газе составляет 0,36-0,60 г/м³, предопределяется их ценностью для ряда отраслей промышленности в качестве исходного сырья в производстве красителей, лекарственных препаратов, пестицидов и т.д.

Промышленные методы извлечения аммиака и пиридиновых оснований из коксового газа относятся к абсорбционно-химическим. В них растворение аммиака сопровождается его химическим взаимодействием с растворителем.

В отечественной коксохимической промышленности распространен так называемый *сатураторный* способ извлечения аммиака. В нем при 50-60°C осуществляется поглощение NH_3 72-78%-й серной кислотой с одновременной кристаллизацией образующегося сульфата аммония. Последний пользуется спросом как удобрение.

При сатураторном способе пиридиновые основания улавливаются одновременно с аммиаком. Для их выделения раствор, освобожденный от кристаллов сульфата аммония, направляется в специальную установку.

Рациональными и экономичными считаются также способы получения на базе коксового газа аммиачной воды или безводного аммиака. В них поглощение NH_3 осуществляется водой, растворами слабых кислот или кислых солей многоосновных кислот.

Применение воды менее эффективно. Хорошо зарекомендовали себя в качестве поглотителей растворы дигидрофосфатов аммония:

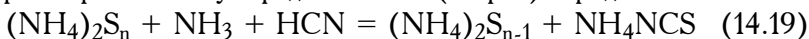


Поглощенный при 40-45°C аммиак десорбируют из раствора аммонийдигидрофосфата за счет его подогрева. Далее в специальной ректификационной колонне из полученной 20-30%-й аммиачной воды выделяют безводный аммиак, содержащий 99,99% NH_3 и не более 0,003% CO_2 . Абсорбент — раствор дигидроаммонийфосфата — возвращается в абсорбер.

В Японии и США производство безводного аммиака по рассмотренной технологии уже в 70-х гг. 20 в. осуществлялось более чем на

20 крупных предприятиях. Метод запроектирован для всех новых установок очистки коксового газа от аммиака (*Утилизация... 1994 г.*).

Извлечение из коксового газа чрезвычайно вредных цианистых соединений (их концентрация составляет 1-2 г/м³) достигается связыванием растворами полисульфида аммония (натрия) в роданистые соли:



Цианистая кислота извлекается при этом на 85-90%, однако роданистые соли пока не пользуются широким спросом.

Коксовый газ востребован и как сырье для получения технического водорода и других газов.

Промышленные установки глубокого охлаждения коксового газа с выдачей технического водорода и метана созданы фирмой «Синнипон сэйтэцу». Процесс, основанный на различии в температурах кипения компонентов коксового газа, характеризуется высокой степенью извлечения водорода при сравнительно низкой его чистоте (до 98%).

В Японии и других странах также эксплуатируются установки для получения водорода адсорбционным разделением коксового газа под давлением. Чистота водорода на этих установках 99,5% и выше.

В США фирма «Теннеко» создала процесс, в котором коксовый и доменный газы обрабатывают сложным органо-минеральным соединением $\text{CuAlCl}_4 \cdot \text{C}_7\text{H}_8$, выделяя смеси, обогащенные водородом и оксидом углерода.

Кроме того, на базе доменного, коксового и конвертерного газов в Японии работают промышленные установки по производству щавелевой, муравьиной и уксусной кислот, метанола, уксусного ангидрида и других ценных химических компонентов.

Некоторое распространение получила переработка углеродсодержащих газов, имеющих повышенные концентрации CO и CO₂.

Оксид углерода технологических газов металлургических предприятий можно рассматривать как сырье для органического синтеза. При реализации каталитических процессов на основе CO и H₂ (синтез Фишера-Тропша) выделяют широкий спектр химических продуктов и полупродуктов. Лучшими катализаторами служат никель, кобальт и их соединения. Несколько уступают им железные катализаторы, однако они намного дешевле.

В мировой практике синтез Фишера-Тропша с производством моторного топлива осуществлен на ряде крупных промышленных установок США, ФРГ, ЮАР и других стран. На основе этого же синтеза получают спирты, олефины, кислородсодержащие соединения, метанол, нафены и т.д. На российских предприятиях каталитическим синтезом из CO и H₂ производят метанол и формальдегид.

При использовании CO_2 , как выделенного при очистке различных газов, так и содержащегося в них (в отсутствие очистки), следует учитывать, что диоксид углерода является окислителем и может применяться, в частности, для конверсии углеводородных газов (природного, коксового, нефтяного).

Примером такого подхода является процесс НКГ, разработанный фирмой «Ниппон Кокан Гэс». В нем для конверсии коксового газа используется колошниковый газ, специально отводимый с периферии доменной печи и обогащенный CO_2 . Конверсированный газ содержит, %: 40-42 H_2 ; 33-36 CO ; 3,5-4,5 H_2O ; 2,5-3,5 CO_2 ; 22-24 N_2 , а также 1,3-5,0 г/м³ сажи. При применении горячего восстановительного газа (ГВГ), полученного по способу НКГ, расход кокса на выплавку чугуна может быть снижен с 430 до 300 кг/т. Одновременно достигается существенная экономия кислорода, расходуемого при паро-кислородной конверсии. Недостатком ГВГ, производимого с использованием даже «периферийного» доменного газа, является повышенное содержание в нем азота.

Другое направление применения продукта углекислотной конверсии природного и коксового газа — получение восстановительных газовых смесей для прямого производства железа. Так, в наиболее распространенном процессе «Мидрекс» изготовления металлизированных окатышей охлажденный и очищенный от пыли колошниковый газ из шахтной печи (содержание, %: 14-16 CO_2 , 35-40 H_2 , 16-18 CO , 22-24 H_2O , 4-5 CH_4 , 2-3,5% N_2), контактирует при 950-980°C с природным газом в присутствии никелевого катализатора. Конверсированный газ содержит до 95% $\text{H}_2 + \text{CO}$, не более 2-2,5% CO_2 , 4-5% H_2O и используется для металлизации окатышей.

14.3. Вторичные энергетические ресурсы

14.3.1. Общие сведения

Как отмечалось ранее, 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 совершении работы, но и в передаче некоторого количества теплоты теплоприемнику с более низкой температурой. Теплота, поступающая в теплоприемник, составляет энергетические потери тепловой машины.

Таким образом, ее КПД, в соответствии с выражением (1.3), всегда меньше 1 (разд. 1.6).

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 полезного использования природных энергетических ресурсов, т.е. в законченном жизненном цикле, составляет примерно 25% (табл. 14.2). Из таблицы следует, что наибольшие потери приходятся на установки, производящие преобразованные виды энергии (электроэнергия, тепло пара и горячей воды, обогащенное топливо), и на установки ее конечного использования (технологические аппараты).

Таблица 14.2

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 тепла в *атмосферу* от совокупности промышленных объектов показывает наличие регионов площадью до 10 тыс. км² с тепловыделением от 10 до 200 Вт/м². 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 тепла туманов, облачности, увеличению атмосферных осадков.

Сброс тепла 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 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 энергоснабжения других потребителей (*Методика...*).

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, щепа, опилки, стружка, шлаки 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, в соответствии с определением ВЭР, тепловая энергия отходов, выходящая из технологического агрегата и предназначенная для подогрева вещественных потоков, поступающих в этот же агрегат, ко вторичным энергоресурсам не относятся.

ВЭР избыточного давления — это потенциальная энергия покидающих установку газов, воды, пара, имеющих повышенное давление, которое может быть еще использовано 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 одновременно 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 востребо-

ваны среднетемпературные энергетические отходы, низкотемпературные применяются еще реже.

Основное оборудование для использования тепловых ВЭР – 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 (*Вяткин*). 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 (тепловые потери с газами 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 приходится 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, хотя объем энергопотребления вырос в 2,4 раза.

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 энергоёмкость 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. И здесь есть значительные резервы. Современные технологии утилизации ВЭР позволяют резко увеличить эффективность потребления топлива. Даже в кузнечных цехах с их небольшим (несколько процентов) тепловым КПД он, при многоступенчатости использования тепла, может быть повышен до 92% (Новгородский...).

14.3.2. 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 максимальном 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 высоко- и среднепотенциальными 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 м³/т чугуна; состав, %: 23-40 СО, 12-22 СО₂, 1,5-6,0 Н₂, остальное — азот; теплота сгорания ~4 МДж/м³; давление на колошнике до 0,4 МПа.

Очищенный от пыли (Кн. 2) 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_2 .

Кроме того, доменный газ, обладая избыточным давлением, используется также в газовых утилизационных бескомпрессорных турбинах (ГУБТ). Себестоимость электроэнергии, вырабатываемой в них, в 1,5-2,5 раза ниже получаемой на ТЭЦ завода и в 3-5 раз меньше, чем в единой энергетической системе, при сроке окупаемости 2-5 лет. ГУБТ (КПД 80%) позволяет при производстве 1 т чугуна выработать до 20 кВт·ч электроэнергии, компенсировав до 35% затрат на доменное литье (Трубчанин...; Воробьев...; Сперкач).

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.

Следующим (после доменного) по значению источником ВЭР на предприятиях черной металлургии является конвертерный газ. Его усредненный состав при плавке с верхней и нижней продувкой, %: 67-79 CO , 13-16 CO_2 , по 0-3 H_2 и H_2O , 5-14 N_2 . Теплота сгорания газа составляет 8,4-9,2 МДж/м³ при его температуре на выходе из конвертера 1400-1600°C.

Расчеты показывают, что на крупном заводе с производительностью около 7 млн т/год конвертерной стали выход газа составляет ~570 млн т/год, или около 130 млн м³ в пересчете на природный газ (при теплотворной способности последнего на уровне 40 МДж/м³). Таким образом, при выплавке 1 т стали с конвертерными газами выносится энергетический потенциал, равный 17-20 м³ 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_2 , O_2 , N_2 и пары воды;

с частичным дожиганием СО перед котлом-утилизатором (при коэффициенте α 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 СО 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 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 (охладители 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 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 (*Розенгард...*).

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. м³ 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% СО.

Коксовый газ — третий крупный источник горючих ВЭР черной металлургии. Из 1 т сухой шихты, помимо 750-800 кг кокса, получают 320-330 м³ 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/м³).

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). Его вклад в энергообеспечение предприятия может быть значительным: до 20% на металлургическом предприятии (Трубчанин...).

Потенциал коксового газа как теплового ВЭР определяется тем обстоятельством, что он покидает печь с температурой 700-800°С 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°С; в газосборниках — от 400 до 82°С; в первичных холодильниках — от 82 до 30°С. 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°С, 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 (Schüphaus). 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 м³) на обогрев коксовых печей расходуется около 22%, в металлургическом производстве — 56, в городских отопительных системах — 10, на ТЭЦ — 8% и т.д. (Комплексное... 1988 г.). В ней же энергию коксового газа довольно широко используют в 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 м³/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 отходящих 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 тепла за теплообменниками газотурбинных установок обычно устанавливают к/у, поскольку температура продуктов сгорания еще значительна (~450-500°C). Он позволяет вырабатывать пар высоких параметров для технологических или энергетических нужд.

Поскольку температура газов после к/у 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% (*Вторичные... 1988 г.*).

14.3.3. 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 ограничим 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 других 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 CO₂; 0-1 CO; 0,5-2,0 SO₂; 0,5-3,0 O₂ (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 к/у 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 (Buchanenko).

По схеме печь — котел-утилизатор — воздухонагреватель используется также тепло отходящих газов медеаффинировочных 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. м³/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 оса-

ждения грубой пыли в пылевой камере поступают в котел-утилизатор. Поверхность нагрева котла 620 м^2 , производительность, в зависимости от нагрузки конвертера, достигает $40\text{-}100 \text{ т/сут. пара}$.

Отходящие газы шахтных печей медной, никелевой и свинцовой плавки имеют теплотворную способность $200\text{-}700 \text{ ккал/нм}^3$. Наиболее эффективна их утилизация для нагрева воздуха, идущего на дутье в печь. Ориентировочно это дает экономию топлива до $12\text{-}15\%$ 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.

14.3.4. 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, переработку отходов.

На машиностроительных предприятиях тепловые ВЭР сравнительно высоких параметров образуются в основном в мартеновских, нагревательных и термических печах в виде тепла отходящих газов, охлаждения установок и продукции. Кроме того, низкопотенциальное тепло 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 тепла отходящих газов на машиностроительных предприятиях является использование запечного парообразователя для выработки пара сравнительно невысоких параметров. В этом случае в парообразователе от ТЭЦ направляется первичный перегретый пар высокого давления, который смешивают с количеством конденсата, необходимым для доведения смеси до относительной влажности $0,80\text{-}0,85$. 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 тепла 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 отходящие 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°C 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 м³/т (температура 750-800°C).

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°C 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 тепла отходящих газов керамзитовых печей для отопления и вентиляции производственных помещений. Уста-

новка способствует также улучшению условий труда рабочих на складах глины и транспортных галереях (*Вторичные... 1988 г.*).

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

В к/у 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.

Более 70% тепла 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.

14.3.5. 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 и шахтных вод (10-15), грунта (5-10) и др.

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 (Безруцких).

Одним из солидных источников НПП 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 мягого 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 поступала для горячего водоснабжения, отопления жилых и административных зданий, технологических нужд нескольких комбинатов силикатных изделий. Это позволяло ежегодно экономить до 30% тепловой энергии (*Вторичные... 1988 г.*).

Особенности утилизации НПП связаны с его 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 (*Розенгарт...*).

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.

Цикл Ранкина, или Клаузиуса-Ранкина, внедрен также на цементных заводах Германии для утилизации тепла охлаждающего воздуха клинкерного холодильника.

Воздух из клинкерного холодильника (температура 275°C, объем 150 тыс. м³/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 установок заключается в циркуляции в ней пентана с температурой кипения 36,1°C или пропана. В противотоке с жидким маслом пентан 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 (Claus...; Duda...).

В дальнейшем за счет цикла Ранкина рассчитывают покрывать до 12% потребности предприятия в электроэнергии (Baatz; Эффективность...).

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 (Waste — to...).

На цементных заводах Китая, Японии, Корейской республики, Таиланда для рекуперации используют отходящие газы циклонных подогревателей и охладителей клинкера. Последняя из таких установок построена на цементном заводе в штате Гуджарат (Индия), расположенном на берегу Индийского океана. Отходящее тепло используется для обессоливания морской воды объемом 2000 м³/сут. Котел-утилизатор производит 14 т/ч пара с давлением 7 бар, температура выбрасываемых в атмосферу газов снижается с 270 до 170°C (Abwärmerückgewinnung...).

Весьма эффективны при использовании НПТ *тепловые насосы* (ТН). Они предназначаются 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 кон-

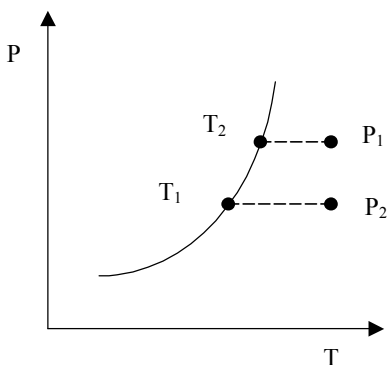


Рис. 14.2. Зависимость давления P насыщенных паров от их температуры T

денсации (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 закону 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. 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 регулирующий вентиль конденсат подают в испаритель. Таким образом, работа теплового насоса непрерывно воспроизводится.

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.

В качестве примера рационального использования НПТ в тепловых насосах можно указать также на утилизацию тепла сточных вод в ФРГ (Kobel...). Их температура в сетях составляет 10-20°C, и они применяются для подогрева воды до уровня 90°C. Ее подают в системы отопления, для нагрева метатенков и т.д. (КПД установок ~50%).

Теплоту низкотемпературных газов эффективно утилизируют также в *экономайзерах*. К ним относятся устройства для подогрева воды (перед впуском в котел котельной установки) или воздуха (перед подачей в топку). Они используют теплоту конденсации паров воды 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. м³/ч. Использование теплоты вентиляционных выбросов в них составляет 70-75%.

К теплообменникам с промежуточным теплоносителем относятся, в частности, *тепловые трубы* (ТТ). Как следует из рис. 14.3, отходящие газы омывают горячий конец

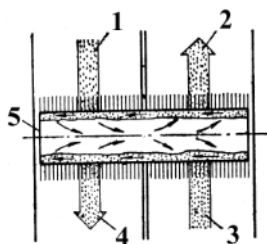


Рис. 14.3. Схема тепловой трубы:

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

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 заполнители. 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 воздухонагревателей для подогрева воздуха, поступающего в их горелки. При температуре газов 230°C воздух прогревается до 180°C .

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°C , пар давлением $0,13-0,15$ МПа, горячая вода с температурой 130°C .

14.3.6. 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 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 индустриальных 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. Действительно, в течение последних 15 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.