

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова»

С.В. Картавец, Е.Г. Нешпоренко

СИСТЕМЫ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Магнитогорск
2011

УДК 620.92

Рецензенты:

Заведующий кафедрой электроснабжения и энергообеспечения
Орского гуманитарно-технологического института,
доцент, кандидат технических наук
В.И. Барбаев

Ведущий инженер Научно-технического центра
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»,
кандидат технических наук
К.В. Строгонов

Картавцев С.В., Нешпоренко Е.Г.

Системы вторичных энергетических ресурсов: учеб. пособие. –
Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2011. 72 с.

В учебном пособии рассматриваются вторичные энергетические ресурсы промышленности как естественное продолжение применения товарного топлива для производства промышленной продукции и энергии.

Пособие предназначено для студентов, изучающих курс «Системы вторичных энергетических ресурсов»; для студентов-заочников, инженеров по направлению «Теплоэнергетика».

УДК 620.92

© Магнитогорский государственный
технический университет
им. Г.И. Носова, 2011
© Картавцев С.В.,
Нешпоренко Е.Г., 2011

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вторичные энергетические ресурсы в промышленности возникают при использовании в установках, системах и комплексах технологического и энергетического оборудования товарного топлива, поставляемого от месторождений первичных энергетических ресурсов – углей, нефти и природных газов.

На многих предприятиях, в том числе на заводах черной и цветной металлургии, нефтеперерабатывающих, химических, а также заводах ряда других отраслей промышленности, в процессе производства выделяются горючие газы, которые, как правило, используются на этих же предприятиях в качестве топлива.

Технологические системы и установки используют все виды энергии для производства промышленной продукции, но используют не полностью. Остаточные потоки энергии покидают технологические установки системы и комплексы в виде теплоты горячих газов, давления газов, горячих продуктов, отходов и т. д.

Часть остаточных потоков энергии называется вторичными энергетическими ресурсами (ВЭР).

Так, на металлургических заводах доля технологических горючих газов составляет более 50% общего годового потребления топлива заводом, а по абсолютным цифрам выход горючих газов на одном заводе эквивалентен нескольким миллионам тонн условного топлива в год. Поэтому возможно более полное использование горючих технологических газов имеет большое значение. Однако эффективное их использование связано с целым рядом серьезных трудностей. Эти газы, как правило, токсичны, содержат много пыли и вредных веществ.

Под вторичными энергоресурсами подразумевается энергетический потенциал продукции, отходов, побочных и промежуточных продуктов, образующихся в технологических агрегатах (установках, процессах), которые не используются в самом агрегате, но может быть частично или полностью использован для энергоснабжения других агрегатов (процессов).

Таким образом, использование собственных ВЭР предприятия позволяет сократить потребление энергии внешних источников: закупаемого топлива или электроэнергии.

Использование ВЭР позволяет существенно повысить эффективность использования топлива и энергии в промышленности через замещение товарного топлива.

ВВЕДЕНИЕ

Примерная карта обучения промышленных теплоэнергетиков включает в себя и вопросы изучения вторичных энергетических ресурсов (ВЭР).

Энергоменеджмент				Управление и развитие			
Системные задачи			Энергоснабжение	Энергоиспользование	Энергосбережение		
Системные аспекты		Построение и оптимизация	Надежность	Проектирование	Эксплуатация	Исследование	
Системные компоненты	Топливоснабжения	Водоснабжения	Теплоэлектро-снабжения	Газоснабжения	Холодоснабжения	Вторичных энергоресурсов	Теплотехнологические
СИСТЕМНЫЙ	ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ = 1990 = СИСТЕМЫ ТЕПЛОЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ 1991						ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
Стационарный	Котельные	Компрессорные	Водные	Газовые	Электрические	Кислородные	Холодильные
Агрегатный		Генераторы	Передающие	Преобразователи	Двигатели	Приемники	
Основы. Процессы			Энергетические ресурсы	Теоретические основы	Энергоносители		
Введение История				Введение История			

Естественное место этой дисциплины – после изучения энергетических ресурсов вообще, так как ВЭР представляют собой побочную продукцию использования товарного топлива и других энергетических ресурсов.

Поэтому сведения по ВЭР в данном пособии предваряются общими сведениями по энергетическим ресурсам.

1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ – ПЕРВОИСТОЧНИК ВЭР

Энергетический ресурс (energy resource) – запасы энергии, которые при данном уровне техники могут быть использованы для энергоснабжения.

Первичный энергоресурс (primary energy resource) – энергоресурс (сырая нефть, природный газ, уголь, горючие сланцы, ядерная энергия, гидроэнергия, геотермальная, солнечная, ветровая энергия и т.д.), который не был подвергнут какой-либо переработке или преобразованию.

Широкое применение какого-либо энергетического ресурса в промышленности начиналось не произвольно, а в определенной исторической последовательности, обусловленной соответствующим развитием техники и технологии (рис.1).

- энергия биомассы (дрова);
- энергия воды (водяные мельницы);
- энергия ветра (ветряные мельницы);
- энергия угля (паровые машины);
- энергия нефти (карбюраторные двигатели);
- энергия расщепления атомного ядра;
- энергия Солнца;
- энергия природного газа.

Следует заметить, что природный газ является новейшим энергоносителем, широкое применение которого было начато только во второй половине XX века, и после которого в промышленности пока не появился ни один новый первичный энергетический ресурс.

Энергия окружающей среды. Определение, постановка

Окружающая человека среда – земля, вода, воздух, солнце – буквально пронизана потоками энергии в различных формах.

Поток солнечной энергии, падающий на Землю, может быть использован непосредственно. Кроме того, он приводит в движение земные воду и воздух. Ежегодно он запасается в биомассе, в основном – растений (дрова), и в относительно небольшой части – животных.

Поток солнечной энергии, падавший на Землю длительное время, запасен в угле, нефти и, вероятно, природном газе.

Теплота Земли и ядерные расщепляющиеся материалы (уран, плутоний) имеют не столь определенное происхождение, однако, также отчасти могут быть отнесены к солнечной активности и другим космогоническим факторам.

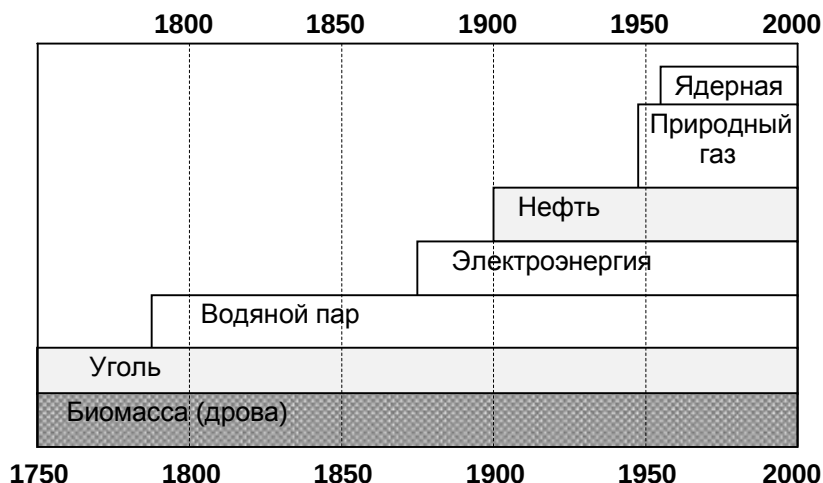


Рис. 1. Начало промышленного использования энергоносителей

Энергетическое состояние земного воздуха, выражаемое его температурой, претерпевает циклические изменения (суточные, месячные и годовые), отражающие огромные потоки тепловой энергии, движущиеся в окружающей среде. Годовой ход температур воздуха достигает 100°C и представляет собой мощный энергетический ресурс. Аналогичные процессы, хотя и в меньшей степени, относятся к водным массам, выполняющим, в основном, роль аккумуляторов этого теплового энергетического ресурса.

Современный уровень техники и сложившиеся традиции позволяют со значительной скоростью истощать аккумулированные энергетические ресурсы, в первую очередь нефть, а также – уголь, которые, по имеющимся пока сведениям об их происхождении, не могут быть пока признаны возобновляемыми.

Между тем, окружающая среда буквально пронизана очень большими потоками энергии, которые достоверно являются возобновляемыми: энергия солнечного излучения, движущейся воды и ветра, биомассы, температуры воздуха и воды.

Ближайшая область развития энергетики, вероятнее всего, связана не с топливным направлением (включая ядерное топливо), а с использованием возобновляемых энергетических ресурсов.

Для этого и необходимо изучение физико-химических характеристик возобновляемых энергетических ресурсов.

Изучение и применение возобновляемых энергетических ресурсов представляет собой чрезвычайно актуальную научно-техническую задачу.

1.1. Уголь

Характеристика угольной промышленности

В первой половине XX века уголь играл основную роль в мировом энергосбережении. Но открытие большого числа месторождений нефти в 50–60-е годы привело к быстрой и практически повсеместной потере углем своего лидирующего положения в удовлетворении энергетических потребностей. Вытеснению угля из энергетического баланса мира содействовало также непрерывное наращивание в ряде стран добычи и использования природного газа, являющегося наиболее экологически чистым видом топлива (табл. 1).

Таблица 1

Мировые ресурсы угля

Доказанные запасы угля на 1.1.99, млн т	Каменный уголь	Бурый уголь	Всего	Доля в мире	Отношение запасов к добыче
Северная Америка	116707	139770	256477	26,1%	235
Центр. и Южная Америка	7839	13735	21574	2,2%	
Европа	41664	80368	122032	12,4%	158
Россия	49088	107922	157010	15,9%	
Африка и Ближний Восток	61355	250	61605	6,2%	266
АТР	184450	107895	292345	29,7%	146
Всего мир	509491	474720	984211	100%	218

Источник. BP World Energy Statistics, 1999.

Однако, начиная с 1974 года, то есть с обострением энергетического кризиса в капиталистическом мире, роль угля в мировом энергоснабжении постепенно начинает возрастать. Этому способствует тот факт, что ресурсы угля значительно более распространены и что по своим масштабам они несравненно больше, чем ресурсы нефти и природного газа вместе взятые. Следует отметить, что увеличение добычи и использования угля и рост его в доли в мировом хозяйстве происходят медленно. Это вызвано рядом объ-

активных причин, важнейшими среди которых следует считать высокую капиталоемкость и длительность сроков создания новых угледобывающих предприятий, необходимость перестройки энергопотребляющего аппарата в связи с переходом с жидкого топлива на твердое, для чего иногда требуются создание и освоение принципиально новых технологий и оборудования.

Согласно классификации МИРЭК уголь делится на каменный и бурый, при этом масштабы геологических ресурсов и разведанных запасов определяются с учетом теплоты сгорания, глубины залегания и мощности пластов (табл. 2).

Таблица 2

Классификация геологических ресурсов
и разведанных извлекаемых запасов углей

Вид угля	Относятся к	
	геологическим ресурсам	технически и экологически извлекаемым запасам
Каменный, теплота сгорания 23,8 кДж/кг и более: Максимальная глубина залегания пластов, м Минимальная мощность пласта, м	2000 —	1500 0,6
Бурый, теплота сгорания менее 23,8 кДж/кг: Максимальная глубина залегания пластов, м Минимальная мощность пластов, м	1500 —	600 2

Согласно оценке мировых ресурсов углей 1913 года общее количество каменного угля, залегающего на глубине до 1800 м и в пластах мощностью не менее 0,3 м, и бурого угля, залегающего на глубине до 1200 м и в пластах не менее 0,6 м, составляло 7398 млрд т.

Выполненные в последующем геологические изыскания выявили ряд новых угленосных районов, в результате чего общие геологические ресурсы углей постепенно возрастали. По мере разведки разрабатываемых и новых месторождений увеличивались оценки мировых разведанных извлекаемых запасов углей.

Дальнейший рост геологических ресурсов углей будет, вероятно, происходить в основном за счет регионов, где угольная промышленность слабо развита или совсем отсутствует, и где поиски и разведка месторождений углей проводились в малых масштабах.

Вместе с тем и в традиционных угледобывающих регионах и странах возможен рост геологических ресурсов, главным образом, в результате учета тех ресурсов углей, которые ранее, в силу их недостаточной экономической эффективности, не учитывались статистикой.

Что же касается разведанных извлекаемых запасов углей, то их масштабы будут возрастать, несмотря на ожидаемое в перспективе увеличение уровня годовой добычи. Это увеличение будет происходить как за счет перевода части геологических ресурсов в категорию разведанных запасов, так и в результате совершенствования техники и технологии добычи, благодаря чему появится возможность повысить коэффициент извлечения углей из пластов разведанных месторождений, который в современных условиях МИРЭК принимается равным 50%. *Коэффициент извлечения углей*, равно как и других полезных ископаемых, показывает, какая доля общего объема залегаемых в месторождении углей может быть извлечена на поверхность Земли при современной технике и при приемлемых на данный период времени экономических показателях.

Согласно современным оценкам, основная часть всех мировых геологических ресурсов и разведанных запасов углей сосредоточена к северу от 30° северной широты. При этом около половины всех мировых геологических ресурсов и свыше 1/6 всех разведанных в мире извлекаемых запасов углей МИРЭК относится на долю бывшего Советского Союза.

Согласно классификации, принятой в МИРЭК, каменные угли подразделяются на битуминозный (включая антрацит) и подбитуминозный. На долю битуминозного угля (теплота сгорания выше 26700 кДж/кг) приходится 62% мировых геологических ресурсов и 74% разведанных запасов. Остальные 38 и 26% соответственно падают на подбитуминозный уголь (23900–26800 кДж/кг). Примерно 10% всех геологических ресурсов в 8% разведанных запасов приходится на долю бурых углей и лигнитов (18850–19260 кДж/кг).

За весь период широкой разработки угольных месторождений (примерно с 1860 года) из недр Земли было извлечено более 12,0 млрд т углей всех видов. Иными словами, начальные геологические ресурсы углей сократились в результате их разработки менее чем на 1%.

1.2. Нефть

Наша страна обладает одним из крупнейших на планете нефтяных потенциалов. Ее перспективные и прогнозные ресурсы оцениваются в 62,7 млрд т, что составляет 13% всех имеющихся на

Земле. По этому показателю Россия занимает четвертое-пятое место в мире. Эксплуатируемые нефтяные запасы составляют 5% мировых (табл. 3).

Таблица 3

Мировые ресурсы нефти

Доказанные запасы нефти на 01.01.99	Млрд. т	Доля в мире	Отношение запасов к добыче
Северная Америка	11,5	8,0%	18,1
Центр. и Южная Америка	13,0	8,5%	37,4
Европа	2,7	2,0%	8,4
Россия	6,7	4,6%	21,9
Ближний Восток	91,2	64,0%	83,2
Африка	10,1	7,0%	28,0
АТР	5,8	4,2%	15,9
Всего мир	143,4	100,0%	41,0

Источник. BP World Energy Statistics, 1999.

Путь нефти от месторождения до потребителя

Нефть поступает из недр земли по специально пробуренным до нефтяных продуктивных пластов эксплуатационным скважинам. Вместе с нефтью поднимаются на поверхность различные механические примеси (частицы породы, цемента), растворенные в нефти газ (попутный газ), вода и минеральные соли в виде кристаллов в нефти и раствора в воде. Присутствие воды с растворенными минеральными солями в нефти приводит к удорожанию транспорта в связи с возрастающими объемами транспортируемой жидкости, а также приводит к усиленной коррозии металла трубопроводов и оборудования, затрудняет переработку нефти. Наличие механических примесей вызывает абразивный износ трубопроводов, нефтеперекачивающего оборудования, затрудняет переработку нефти. Легкие фракции нефти (попутный газ) являются ценным сырьем для нефтехимической промышленности. Поэтому необходимо стремиться не только к снижению потерь легких фракций из нефти, но и к сохранению всех углеводородов, извлекаемых из недр, для последующей их переработки. Перед подачей нефти в магистральный трубопровод следует отделить механические примеси, воду, соли и попутный газ. Подготовка нефти к транспорту производят на промыслах. Сбор и подготовка нефти и попутного газа на площадях месторождений, начинающиеся с устья скважины и заканчивающиеся на установках подготовки нефти и газа, являются единой технологи-

ческой системой. Нефть от группы скважин поступает на автоматизированные групповые замерные установки (АГЗУ). На этих установках замеряется количество нефти из каждой скважины. Здесь же нефть подвергают частичным дегазации (удалению газа) и обезвоживанию. Затем частично дегазированная и обезвоженная нефть поступает по трубопроводу на центральный пункт сбора (ЦПС). На ЦПС расположены установка комплексной подготовки нефти (УКПН) и установка подготовки воды (УПВ). На УКПН выполняют окончательную подготовку нефти, то есть ее дегазацию, обезвоживание и очистку от механических примесей. Вода, выделенная из нефти, поступает на УПВ, где осуществляют ее необходимую подготовку и очистку. Подготовленная вода поступает на кустовые насосные станции (КНС), а оттуда под давлением до 20 МПа закачивается через специальные нагнетательные скважины в продуктивные нефтяные пласты. Закачка воды в пласт оказывает давление на нефть и вытесняет ее к забоям скважин, повышая дебит каждой скважины и продлевая период фонтанной эксплуатации.

Попутный (нефтяной) газ, отделенный от нефти на УКПН, направляют для переработки по газопроводу на ГПЗ. Нефть, подготовленная на УКПН, поступает на головную насосную станцию, которая создает необходимое давление для обеспечения перемещения нефти по магистральному трубопроводу. Это давление в нефтепроводах достигает 6,4 МПа. Но по мере удаления от головной насосной станции за счет гидравлического сопротивления давление в нефтепроводе снижается. Поэтому обычно через каждые 100–150 км по трассе нефтепровода устанавливают промежуточные насосные станции (ПНС), которые и поддерживают необходимый режим транспортировки нефти по нефтепроводу.

По магистральному нефтепроводу нефть поступает на НПЗ, где из нее получают различные нефтепродукты (бензин, керосин, дизельное топливо, мазут, различные масла). От НПЗ нефтепродукты различным транспортом – по нефтепродуктопроводам, железнодорожным, водным направляют на нефтебазы и затем к потребителям. По нефтепродуктопроводам обычно транспортируют нефтепродукты со сравнительно небольшой вязкостью (бензин, керосин, дизельное топливо). Транспортировка по трубопроводам нефтепродуктов с большей вязкостью (например мазута) связана с большими трудностями. Для снижения вязкости мазута его предварительно подогревают. Транспортировку мазута по трубопроводам осуществляют только на короткие расстояния (50–100 км). Часть нефтепродуктов транспортируют железнодорожным и водным транспортом (танкерами, баржами и в мелкой таре).

Переработка

Сбор и подготовка нефти на нефтяных промыслах

На всех вновь сооружаемых нефтяных промыслах используют централизованную схему сбора и подготовки нефти. По этой схеме сбор продукции производят от группы скважин на автоматизированные групповые замерные установки (АГЗУ). От каждой скважины по индивидуальному трубопроводу на АГЗУ поступает нефть вместе с газом и пластовой водой. На АГЗУ производят учет точного количества поступившей от каждой скважины нефти, а также первичную сепарацию для частичного отделения пластовой воды, нефтяного газа и механических примесей с направлением отделенного газа по газопроводу на ГПЗ. Частично обезвоженная и частично дегазированная нефть поступает по сборному коллектору на центральный пункт сбора (ЦПС). Обычно на одном нефтяном месторождении устраивают один ЦПС.

Но в ряде случаев один ЦПС устраивают на несколько месторождений с размещением его на наиболее крупном месторождении. В этом случае на отдельных месторождениях могут сооружаться комплексные сборные пункты (КСП), где частично производится обработка нефти. На ЦПС сосредоточены установки по подготовке нефти и воды. На установке по подготовке нефти осуществляют в комплексе все технологические операции по ее подготовке. В связи с этим установку по подготовке нефти называют установкой по комплексной подготовке нефти (УКПН). Обезвоженная, обессоленная и дегазированная нефть после окончательного контроля поступает в резервуары товарной нефти и затем на головную насосную станцию магистрального нефтепровода.

1.3. Ядерные ресурсы

Общая характеристика

Ядерная энергия как энергетический ресурс – энергия расщепления ядерного топлива, в основном – урана.

При оценке ядерных ресурсов для энергетики необходимо учитывать следующие основные факты:

1. Первым применением ядерной энергии было военное: в 1945 году армией США, без всякой военной необходимости, две первые атомные бомбы были взорваны в двух **городах** (!!!) Японии – 6 августа в Хиросиме и 9 августа в Нагасаки.

Применение ядерной энергии в энергетике началось на десятилетие позже: в 1954 году была получена первая электроэнергия от атомной электростанции в СССР, г. Обнинск. До настоящего времени ядерная энергетика развивается вслед за массовым производством, испытанием и хранением ядерного оружия.

2. Природный уран является рассеянным элементом со средним содержанием его в земной коре $2,5 \cdot 10^{-4}\%$, а в рудах, как правило, – менее 1% с нижним пределом содержания в перерабатываемых материалах до 0,01%.

3. Принципиальным отличием от других ископаемых топлив является то, что запасы урана непрерывно уменьшаются за счет естественного радиоактивного распада.

4. При использовании урана в энергетике образуется относительно большое количество радиоактивных отходов, основное решение по которым – захоронение (а значит – и накопление) в окружающей среде, что идет категорически вразрез с глобальными экологическими требованиями.

5. Основным направлением ядерной энергетики специалисты называют не расщепление элементов, а синтез их (термоядерные энергетические реакции).

Сумма приведенных фактов позволяет сделать следующие выводы:

- ядерное оружие является причиной и гарантом существования ядерной энергетики;
- ядерная энергетика является видимой частью военного ядерного потенциала;
- в случае полного уничтожения ядерного оружия добыча, обогащение, расщепление и захоронение отходов могут оказаться экономически, экологически и энергетически неоправданными.

Запасы ядерного горючего

В мире

В настоящее время в мире на базе ядерного горючего вырабатывается примерно 17% электроэнергии. На начало 1998 года в 32 странах мира насчитывалось 440 атомных энергоблоков в эксплуатации и 42 – в строительстве.

Основным горючим для атомной энергетики является уран. За весь предшествующий период из недр Земли было добыто 1,8 млн т урана, а в 1996 году – 36 000 т.

Доказанные извлекаемые запасы урана по цене 80 долл./кг составляют 2,5 млн т и по цене от 80 до 130 долл./кг – 856 000 т. По этим данным ресурсная обеспеченность атомной энергетики при извлечении на уровне 1996 года оценивается сроком до 100 лет (для сравнения – только открытые оценки исчерпания возобновляемого и нерадиоактивного природного газа составляют 80 лет).

В России

Разведанные запасы урана в СССР и РФ отнесены к категории стратегических запасов и не публиковались в открытой литературе.

По иностранным оценкам МИРЭС доказанные извлекаемые запасы урана в РФ с затратами до 80 долл./кг составляют 145 000 т, или около 6% мировых запасов.

Дополнительные ресурсы урана при затратах на добычу до 130 долл./кг оценены в 1,1 млн т или около 10% мировых.

В 1996 году годовая добыча урана в РФ по оценкам МИРЭС составила 2 600 т всей мировой добычи 36 200 т или 7,2%.

1.4. Природный газ

Возобновляемый ресурс

Природный газ является возобновляемым энергетическим ресурсом, судя по некоторым достоверно известным фактам и вопреки распространенному мнению о его невозобновляемости.

Прогнозные оценки в 1970–1975 годах давали срок выработки этого природного ресурса 50 лет. Естественно в 2001 году ожидать снижения этой величины до 19–24 лет (табл. 4).

Таблица 4

Мировые запасы природных газов

Доказанные запасы газа на 01.01.1999	Трлн куб. м	Доля в мире	Отношение запасов к добыче
Северная Америка	8,35	5,6%	11,4
Центр. и Южная Америка	6,21	4,3%	71,5
Европа	5,21	3,6%	18,3
Россия	48,14	32,9%	82,7
Ближний Восток	49,53	33,8%	
Африка	10,22	7,0%	
АТР	10,17	6,9%	41,4
Всего мир	146,39	100,0%	63,4

Источник. BP World Energy Statistics, 1999.

Однако прогнозные оценки 2000 года дают величину 80 лет. Этих фактов достаточно, чтобы утверждать следующее:

- прогнозные оценки выработки природного газа являются *скользящими*;
- прогнозные оценки могут существенно возрастать за период прогноза;
- через 80 лет прогнозная оценка по ПГ может существенно возрасти;
- открытые прогнозные оценки выработки природного газа являются частью общих *закрытых* прогнозных оценок.

Что касается сроков истощения газовых месторождений в 50–80 лет, то это только нижняя и неполная граница оценки.

По сообщениям ООН запасы природного газа составляют 141–200 млрд м³. Кроме того, значительное количество метана содержится в нефти – от 1–2 до нескольких тысяч м³/т, что при содержании 1000 м³/т дает до 140 765 млрд м³, то есть еще столько же.

Кроме того, значительное количество метана содержится в каменных углях: до 50 м³/т и более, что при 50 м³/т и запасах каменного угля 20 трлн т (оценка по 12,8 млрд т у.т) дает дополнительные запасы метана около 1000 000 млрд м³, что всемерно больше запасов чисто газовых месторождений на континентах и в шельфе.

Кроме того, запасы газа в газогидратных месторождениях примерно в 100 раз превышают его запасы в традиционных месторождениях на суше и морском шельфе (то есть его хватит уже на 5000–8000 лет).

Кроме того, огромная масса горючих (углеводородных) газов находится в растворенном состоянии в подземных водах. Среднее содержание метана в подземных водах Западно-Кубанского прогиба колеблется от 1 до 10 м³/м³. Общее количество метана, растворенного в пластовых водах, во много раз превышает все его запасы в газовых и нефтяных месторождениях и составляет по Л.М. Зорькину $n \cdot 10^{16}$ м³.

При современной ежегодной мировой добыче 2–2,5 трлн м³ газа сроки выработки перечисленных ресурсов лежат в интервале от 56 до 7060 лет (табл. 5).

Для оценки этих сроков можно указать, что практически вся современная российская черная металлургия создана за период от 1932 (Магнитогорский и Кузнецкий комбинаты) до 1986 года (крупнейшая доменная печь на ЧерМК), то есть за 54 года, а российская космонавтика – за период от 1903 (первая научная статья К.Э. Циолковского) до 1957 года (запуск первого спутника), то есть за 54 года.

Таблица 5

Ресурсы природного метана

Источники природного газа	Запасы, трлн м ³	Срок истощения (лет) при ежегодной выработке	
		2 трлн м ³	2,5 трлн м ³
Традиционные месторождения на суше и морском шельфе	141,2	70,6	56,5
В углях	1000,0	500	400
В нефти	1,41–140,76	70,4	56,3
В пластовых водах	10000,0	5000	4000
В газогидратах	14120,0	7060	5648
Итого	24800	12701	10161

При оценке сроков следует учитывать *динамический характер* всех приведенных цифр. Например, с 1990 по 1993 годы, при ежегодной мировой добыче газа в 2–2,5 трлн м³, мировые запасы газа не только не уменьшились на 6–7,5 млрд м³, но еще и возросли на 13 млрд м³.

Если учесть, что традиционные чисто газовые месторождения расположены выше и имеют меньшее пластовое давление, то в качестве источника природного метана для традиционных газовых месторождений естественно указать на нижележащие пластовые воды и газогидратные месторождения с большим пластовым давлением. Впрочем этот вопрос находится за пределами энергетики. Отметим только, как достоверный факт, что за время промышленного использования природного газа (40 лет с 1960 года) запасы природного газа только возрастали.

Физико-химические особенности природного газа и данные о его запасах позволяют сделать несколько выводов:

- природный газ является природным источником чистейшего углерода и достаточно чистого водорода;
- природный газ является транспортной формой углерода на базе водорода;
- ископаемые угли по сути являются труднотранспортабельной складской формой природного углерода и сырьем для природных процессов метанизации, то есть перевода углерода в транспортную форму с полным освобождением от балласта;
- природные процессы метанизации природного углерода могут быть дополнены искусственной промышленной ме-

танализацией без принципиальных технических ограничений;

- все ресурсы каменных углей косвенно через процессы метанизации являются ресурсами природного газа;
- все энергетические и технологические разработки для природного газа обеспечены не только ресурсами наличного природного газа, но и всеми ресурсами каменных углей, косвенно – через процессы метанизации;
- при использовании у потребителей, углерод в форме природного газа создает такие эксплуатационные, экологические и экономические условия, что возврат к применению в тех же условиях сырых углей возможен только теоретически;
- после транспорта и распределения природного газа он может быть разделен на водород и углерод или переведен в другие потребительские формы в соответствии с требованиями технологических процессов;
- конвертирование природного газа является естественным процессом завершения транспорта природного углерода на базе водорода и значительно повышает эффективность использования этого природного энергоносителя.

Природный газ является естественным и самым обильным источником связанного не окисленного водорода и сравнительно легко может быть разделен на углеродную и водородную компоненты.

В этом смысле природный газ открывает реальную дорогу экологически чистой водородной энергетике.

МЕСТО ВЭР В КОМПЛЕКСЕ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Промышленные предприятия выпускают все виды промышленной продукции. Для производства промышленной продукции используются сырье и энергия.

Промышленная теплоэнергетика поставляет промышленным предприятиям все виды энергии и энергоносителей: электроэнергию, теплоту, пар, воду, воздух, кислород и др.

Для промышленного предприятия источниками энергии и энергоносителей могут быть как внешние системы, так и системы теплоэнергоснабжения самого промышленного предприятия. Небольшие промышленные предприятия (например, хлебозаводы, ремонтные и сервисные предприятия) могут не иметь собственных

источников теплоэнергоснабжения и получать все виды энергии из внешних, по отношению к предприятию, систем. Крупные промышленные предприятия (например, металлургические комбинаты, машиностроительные и нефтеперерабатывающие заводы) могут иметь собственные источники теплоэнергоснабжения и развитые теплоэнергетические системы промышленного предприятия.

Промышленные предприятия имеют в своем составе технологические и энергетические установки. Совместно они образуют производственный комплекс.

Технологические установки – это агрегаты и системы, которые выпускают продукцию промышленных предприятий. Пример технологических установок и систем – доменная печь, прокатные станы, аглофабрика, коксовые батареи.

Энергетические установки – это агрегаты, которые производят, преобразуют, транспортируют, распределяют потоки энергии и энергоносителей, а также обезвреживают выбросы и загрязнения как энергетических, так и технологических установок. Энергетические установки: ТЭЦ, ТЭС, ПВС, системы коммуникаций.

Совокупность энергетических установок и систем образует систему теплоэнергоснабжения промышленного предприятия (СТЭС ПП).

Половина потребляемого промышленностью топлива и более трети электроэнергии преобразуется на специальных станциях и установках в энергетический потенциал разнообразных энергоносителей, используемых в технологическом комплексе предприятия:

- теплоту пара и горячей воды;

- энергию давления сжатого воздуха;

- холод технической воды, аммиака или искусственных рассолов и т.п.

Остальная часть топлива и электроэнергии используется в технологическом комплексе непосредственно.

Около 30% необходимой теплоты, 95% электроэнергии, 100% природного газа, твердого и жидкого топлива промышленные предприятия получают из мощных общегосударственных (единых) и районных энергетических систем:

- единой системы топливоснабжения ЕСТ;

- единой системы газоснабжения ЕСГ;

- единой системы электроснабжения ЕЭС;

- районной системы теплоснабжения РСТ.

Остальная потребность в теплоте и других необходимых предприятию энергоносителях обеспечивается функционирующим на каждом предприятии набором специальных энергетических станций.

2. ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

2.1. Общие сведения по ВЭР

Технологические системы и установки используют все виды энергии для производства промышленной продукции, но используют не полностью. Остаточные потоки энергии покидают технологические установки системы и комплексы в виде теплоты горячих газов, давления газов, горячих продуктов, отходов и т.д.

Часть остаточных потоков энергии называется вторичными энергетическими ресурсами (ВЭР).

Использование ВЭР позволяет существенно повысить эффективность использования топлива и энергии в промышленности через замещение товарного топлива.

2.2. Классификация ВЭР

Под вторичными энергоресурсами подразумевается энергетический потенциал продукции, отходов, побочных и промежуточных продуктов, образующихся в технологических агрегатах (установках, процессах), которые не используются в самом агрегате, но могут быть частично или полностью использованы для энергоснабжения других агрегатов (процессов).

Вторичные энергоресурсы по своим техническим характеристикам и ценностной значимости могут быть разделены на следующие группы:

1. Горючие (топливные) ВЭР – горючие газы плавильных печей (доменный, колошниковый шахтных печей и вагранок, конвертерный и т.д.), горючие отходы процессов химической и термохимической переработки углеродистого или углеводородного сырья, используемые (непригодные) для дальнейшей технологической переработки, отходы деревообработки (щепы, опилки, стружки, обрезь и т.д.), щелока целлюлозно-бумажного производства.

2. Тепловые ВЭР – физическая теплота отходящих газов технологических агрегатов, физическая теплота основной и побочной продукции, теплота рабочих тел систем принудительного охлаждения технологических агрегатов, теплота горячей воды и пара, отработавших в технологических и силовых установках.

3. ВЭР избыточного давления – потенциальная энергия газов и жидкостей, покидающих технологические агрегаты с избыточным давлением, которое необходимо снижать перед последующей ступенью использования этих газов и жидкостей или при выбросе их в атмосферу. К этим ВЭР относятся сжатые колошниковые газы до-

менных печей: пар, отработавший в силовых установках, молотах и прессах; газы, уходящие из регенераторов каталитического крекинга и термоконтактного коксования.

По направлению использования ВЭР различают:

1. Теплотехническое – использование и потребление непосредственно получаемых в качестве ВЭР пара и горячей воды или при выработке их за счет утилизации горючих и тепловых ВЭР в утилизационных котельных. К этому направлению относится также генерирование холода за счет использования ВЭР.

2. Электроэнергетическое – при генерировании электроэнергии в утилизационных установках (утилизационных электростанциях) за счет ВЭР.

3. Комбинированное – с выработкой в утилизационных теплоэлектроцентралях теплоты и электроэнергии по теплофикационному графику.

ВЭР можно использовать в качестве топлива либо непосредственно, либо за счет выработки теплоты, электроэнергии, холода и механической работы в утилизационных установках.

Если горючие ВЭР практически полностью используются в производстве, то уровень использования тепловых ВЭР еще низок. К концу 1980 года он составил 30–35%.

В структуре тепловых ВЭР основное значение имеют физическая теплота отходящих от промышленных печей газов и теплота систем испарительного охлаждения, на долю которого приходится до 15%.

Основное количество ВЭР получается на тех предприятиях, где производится пирогазетическая переработка топлива или высокотемпературная обработка металлов и сырья.

Основным оборудованием для использования тепловых ВЭР, а также избыточного давления, являются: котлы-утилизаторы (КУ), системы испарительного охлаждения (с.и.о), охладители конвертерных газов сталеплавильного производства (ОКГ), установки сухого тушения кокса (УСТК), газовые утилизационные бескомпрессорные турбины (ГУБТ), абсорбционные холодильные машины.

Котлы-утилизаторы применяются для использования физической теплоты отходящих горючих газов. В ряде случаев они обеспечивают не только повышение эффективности использования топлива, но в сочетании с технологическими печами способствуют повышению их производительности, улучшению технологического процесса.

Все многообразие ВЭР можно подразделить на три класса:

- горючие ВЭР;
- тепловые ВЭР;
- избыточного давления.

Горючие ВЭР характеризуются тем, что они способны гореть, а значит замещают первичное топливо.

Тепловые ВЭР обладают температурным тепловым потенциалом.

Множество видов промышленного топлива характеризуется нулевым и первым порядками. Множество ВЭР всех типов пропорционально множеству технологических процессов (10^3 – 10^4).

Многообразие ВЭР обуславливает трудности их использования и многообразие применяемого оборудования и систем ВЭР.

Горючие ВЭР – часть энергии, не использованной в технологическом процессе, а также часть энергии технологических материалов, покидающих процессы.

Тепловые ВЭР. Уходящие газы конвертерного производства представляют собой неиспользованную часть энергии растворенного углерода чугуна.

Коксовый газ, отходящий из камеры коксования – часть энергии угля, коксующегося в батарее (часть энергии обрабатываемого материала).

Отходящие газы доменного производства – часть энергии топлива, неиспользованного в доменном производстве (кокс, природный газ).

К горючим ВЭР относятся:

- доменный газ;
- коксовый газ;
- конвертерный газ;
- промпродукты мокрого обогащения углей;
- коксовая мелочь;
- смолы КХП;
- отходы деревообработки;
- горючий щелок целлюлозно-бумажного производства;
- демонтированные и непригодные к дальнейшему использованию горючие элементы зданий и сооружений;
- жидкие остатки нефтепереработки.

Тепловые ВЭР – часть тепловой энергии рабочих тел технологических процессов, не использованных в них.

Так же, как и в случае горючих отходов, разновидностей тепловых отходов очень много и они могут быть твердыми, жидкими и газообразными. Некоторые тепловые ВЭР могут быть одновременно и горючими.

Так, например, горючие отходящие газы имеют начальную температуру: доменный газ (300°C), коксовый газ (700°C), конвертерный газ (1700°C).

Чаще всего газообразные тепловые ВЭР представляют собой отходящие отопительные газы промышленных агрегатов: агломерационные газы, отходящие газы мартеновской печи, отходящие газы нагревательных колодцев и методических печей. Кроме этого тепловые ВЭР могут быть твердыми и жидкими: теплота отходов и продуктов технологического процесса, теплота доменного шлака, теплота жидкого чугуна, теплота агломерата, теплота сталеплавильных шлаков, теплота жидкой стали, теплота горячего проката.

ВЭР избыточного давления: некоторые технологические процессы могут иметь давление выше атмосферного.: рабочее тело выносит из технологического процесса энергию давления. Доменное производство идет под избыточным давлением; дутье под давлением 3.5–4 атм. – выход $P = 2.3$ атм. Это избыточное давление может быть использовано в системе ВЭР (ГУБТ).

2.3. Источники и потенциал ВЭР

Количественными характеристиками ВЭР являются объем, количество и температура. Причем объем ВЭР может принимать различные формы и зависимости.

При анализе производства с несколькими ТП объем может характеризовать процент выхода ВЭР по технологии, отрасли.

Разница этих показателей заключается в том, что процент с большим удельным выходом ВЭР на 1 т продукции может занимать незначительный объем в общем выходе ВЭР. Эту разницу необходимо учитывать при разработке энергосберегающих мероприятий.

Важной характеристикой ВЭР является температурный потенциал. Это связано с тем, что высокий температурный потенциал позволяет организовать более квалифицированное использование ВЭР, получить более ценную продукцию на ВЭР или реализовать сложный процесс.

Источниками ВЭР могут быть энергетические и технологические установки.

Энергетические: на ТЭЦ, КЭС – охлаждающая вода; конденсат турбин; на газовых турбинах – отходящие продукты сгорания; на компрессорных станциях – охлаждающая вода.

Технологические

Гораздо более многочисленные источники ВЭР – промышленные печи, реакторы, установки, системы и комплексы:

- агломашины – отходящие отопительные газы;
- коксовые батареи – отходящие отопительные газы, коксовый газ, кокс;

- сталеплавильные агрегаты – отходящие мартеновские или конвертерные газы;
- хлебопекарные печи – отходящие отопительные газы.

ВЭР технологических агрегатов отличаются от ВЭР энергетических агрегатов тем, что значительную долю в них занимают продукты и отходы. Энергетические установки дают вторичные энергетические ресурсы, в основном – в виде газов, а основной продукцией являются энергоносители.

В технологических установках ВЭР включают как отходящие отопительные газы, так и теплоту продуктов и отходов.

Например, в черной металлургии теплота продуктов и отходов как ВЭР представляет значительную величину и характеризуется высокими температурными потенциалами (табл. 6).

Таблица 6

Объемы и потенциалы ВЭР черной металлургии

Наименование	Масса, т, на 1 т проката	Температурный потенциал, °С
Агломерат	0,8	600
Окатыши ж/д	0,8	400
Кокс металл.	0,4	1100
Чугун	0,9	1500
Шлак (домен.)	0,3	1500
Сталь	1,32	1600
Шлак	0,2	1600
Слитки	1,32	1100
Сляб	1,107	900
Рулоны	1,107	800

Можно обратить внимание, что в производстве жидкой стали одновременно достигаются максимумы массы и температуры. Использование подобного ВЭР может обеспечить энергией другие процессы и сократить расход закупаемого топлива на них.

Еще один источник ВЭР – это потоки теплоты через ограждения высокотемпературных агрегатов и установок. Его особенность связана с тем, что он не связан с движением газов или жидкостей.

2.4. Системы Вторичных Энергоресурсов

Система испарительного охлаждения – применяется для охлаждения горячих поверхностей мартеновских, доменных и нагревательных печей. Они повышают надежность и длительность не-

прерывной работы печей. Производительность одной установки системы испарительного охлаждения доменной печи объемом 2000 м³ составляет 5 кг/с и обеспечивает годовую экономию условного топлива 10–12 тыс.т.

Установки для утилизации теплоты отходящих газов при конвертерном производстве стали приобретают важное практическое значение в связи со все большим распространением этого способа производства.

Установки сухого тушения кокса могут быть использованы для выработки пара и получения ценных химических продуктов. Сухое тушение кокса повышает его качество и снижает потери.

В газовых утилизационных бескомпрессорных турбинах используют избыточное давление доменных газов для производства электроэнергии или для привода компрессоров. Применение этих турбин на крупных доменных печах дает экономию условного топлива около 15 тыс. т в год на каждую печь.

Абсорбционные холодильные машины могут использовать низкотемпературную теплоту промышленных сточных вод, воды охлаждения оборудования, охлаждение продуктов потоков, то есть теплоту, которая в иных установках не может быть использована. Количество такой теплоты очень велико. Утилизация ее позволила бы сэкономить до 45–50 млн т условного топлива в год.

2.5. Основные направления использования ВЭР

Основными направлениями использования ВЭР являются: **внешнее**, направленное на использование энергии за пределами рассматриваемого источника ВЭР, и **регенеративное**, направленное на использование в самом процессе или установке, являющейся источником ВЭР.

В обоих случаях использование энергии может быть направлено как на энергетические потоки (воздух для горения, топливо), так и на технологические потоки (сырье и материалы).

Внешнее энергетическое использование ВЭР приводит к производству энергоносителей общепромышленного назначения – горячей воды, пара, электроэнергии или сжатого воздуха, которые поступают в общезаводские системы для использования за пределами источника данного ВЭР. Энергосберегающий эффект при этом достигается на других установках данного предприятия, производящих ту же продукцию (котельные, ТЭЦ, компрессорные станции).

Внешнее технологическое использование ВЭР может быть направлено на нагрев входящих технологических потоков в другую установку. При этом расход топлива в нее может быть сокращен.

Регенеративное энергетическое использование направлено на подогрев компонентов горения (воздуха и топлива) и приводит к сокращению *видимого* расхода топлива на данную установку.

Регенеративное технологическое использование ВЭР направлено на подогрев входящих в процесс сырья и материалов. При этом также энергосберегающий эффект достигается в данной установке в виде сокращения видимого расхода топлива.

Например, нагрев входящих потоков материалов может осуществляться за счет теплоты охлаждающихся продуктов. Этот прием, называемый *технологической регенерацией*, может обеспечить сокращение видимого расхода энергии на порядок.

* * *

Таким образом, использование собственных ВЭР предприятия позволяет сократить потребление энергии внешних источников: закупаемого топлива или электроэнергии.

3. ВЭР ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

3.1. Производство агломерата

Агломерация – процесс окускования мелких руд, концентратов и колошниковой пыли спеканием в результате сжигания топлива в слое спекаемого материала.

Наибольшее распространение получил способ спекания рудной мелочи на колосниковой решетке с просасыванием воздуха через слой шихты (табл. 7).

Таблица 7

Основные компоненты шихты для спекания

Руда, концентрат, колошниковая пыль,	8–0 мм	40–50%
Возврат	10–0 мм	20–30%
Известняк	2–0 мм	15–20%
Твердое топливо	2–0 мм	4–6%
Влага	-	6–9%

Схема процесса спекания на агломашине ленточного типа

Процесс агломерации осуществляется на агломерационных лентах, состоящих из специальных колосниковых спекательных

тележек – паллет, которые передвигаются со скоростью около 4 м/мин по рельсам.

Под паллетами расположены вакуумные камеры с эксгаустером, создающим разрежение около 10 кПа, под действием которого происходит просос воздуха в количестве около 2500–3000 м³/т агломерата.

Площадь спекания агломерационных машин 50–300 м². Ширина паллет 2–4 м.

На дно слоя загружают так называемую «постель» из возврата 10–25 мм, затем загружают шихту слоем высотой 250–300 мм.

Чтобы процесс начался, специальным зажигательным устройством нагревают верхний слой шихты до 1200–1300°C и топливо воспламеняется. Горение поддерживается в результате просасывания воздуха. Зона горения движется со скоростью 10–40 мм/мин.

При достижении зоной спекания «постели» процесс спекания заканчивается.

В зоне горения температура достигает 1500°C.

Продукты сгорания отдают свою теплоту нижним слоям и уходят с температурой 60–150°C.

Обычно агломерат охлаждают в отдельных устройствах, но иногда и на самой ленте, что требует 60–70 м² дополнительной площади.

Производительность лент 1,3–1,5 т/м² *ч, то есть машины выдают в сутки 1500–10000 т агломерата.

Общая площадь машины 160 м².

Площадь спекания 85 м².

Площадь охлаждения 75 м².

Отходящие газы запылены 10–12 г/м³.

Охлаждение агломерата осуществляется обычно в отдельных охладителях.

В линейных охладителях агломерат укладывается на секционный пластинчатый конвейер, холодный воздух просасывается через агломерат снизу вверх с помощью осевых вентиляторов.

Например, в черной металлургии теплота продуктов и отходов, как ВЭР, представляет значительную величину и характеризуется высокими температурными потенциалами (табл. 8).

Энтальпия готового пирога агломерата составляет от 20 до 40% балансной теплоты.

На тепловые потери приходится 7–10%.

Таблица 8

Тепловой баланс процесса агломерации

<i>Приходная часть</i>	<i>%</i>	<i>Расходная часть</i>	<i>%</i>
Горение твердого топлива	91,5	Физическая теплота агломерата	22,1
Теплота зажигания	8,5	Теплота отходящих газов	33,0
		Тепловые потери	8,5
		Испарение воды	22,1
		Энедотермические реакции	14,3

Возможные направления использования теплоты агломерата:
 подогрев воздуха на горение;
 подогрев холодной шихты смешиванием;
 подогрев воздуха и выработка пара.

Объем ВЭР 630 МДж/т агломерата.

Теплота агломерата 420 МДж/т.

Теплота газов 130 МДж/т.

Фактически теплота агломерата не используется.

3.2. ВЭР. Производство железорудных окатышей

Процесс производства окатышей состоит из двух стадий:
 получения сырых окатышей;

упрочнения окатышей: – подсушка 300–600°C;
 – обжиг 1200–1300°C.

Первая стадия проводится при температуре окружающей среды, при этом из энергоносителей применяются вода и электроэнергия.

Вторая стадия – высокотемпературная, здесь применяется топливо (природный газ или вторичные промышленные газы).

В отличие от агломерационного производства, шихта окатышей не содержит топливных компонентов.

Сырые окатыши – гранулы, шарики диаметром 10 – 20 мм.

Для обжига сырых окатышей применяют ленточную конвейерную машину, подобную агломерационной.

Технологические зоны перекрыты сверху специальными секциями горна.

Тепловой режим каждой секции устанавливают независимо от режима других.

Обычно конвейерная машина состоит из следующих зон:

сушки (одна или две секции)	20%;
подогрева и обжига (от одной до трех секций)	35%;
рекуперации	7%;
охлаждения	38%.

Сушат окатыши газом-теплоносителем с температурой 300–500°C.

Подогревают окатыши до температуры 800–1200°C.

Окислительный обжиг ведут при 1200–1350°C.

Время обжига 7–12 мин.

В зоне рекуперации через слой окатышей просасывается нагретый воздух (300–800°C), поступающий из зоны охлаждения.

Температура отходящих газов 200–400°C.

Температура сходящего слоя окатышей 200–400°C.

3.3. Производство кокса

Энергетика коксового производства

Потребление ВЭР на коксохимических предприятиях страны составляет примерно 15 млн т у.т. ежегодно.

Основная продукция – кокс (76–77%), коксовый газ (14–15%), химические продукты (5–6%) около 80 наименований, 160 сортов.

В основе производства кокса лежит процесс нагрева угольной шихты до 1000–1100°C без доступа воздуха в течение 14–15 ч. Угольная шихта – смесь различных углей (газовых, жирных, коксовых, отощенных спекающихся). При нагреве происходит термическое разложение угля с образованием летучих веществ и твердого остатка – кокса.

Схема производства кокса

Коксовые печи группируются в батареи до 75 штук. Коксовая печь состоит из камеры коксования, отопительных камер и двух пар регенераторов. Коксовые печи отапливаются коксовым и доменным газом.

Сырье: основные коксующиеся угли Ж, КЖ, ОС и К;
присадочные угли ГЖ, СС, Г.

Энергоносители: КГ, ДГ, ПГ, воздух, пар, вода, электроэнергия.

Структура: топливо – 54%, пар – 30%, электроэнергия – 15%.

Операции: шихту загружают в камеру, воздух и газ нагревают в регенераторах до 900–1000°C, нагревают садку до 1000°C, вываливают садку 1000°C, тушат водой, сортируют.

Тепловая работа: в предварительно нагретые регенераторы подают газ и воздух и подогревают их до 900–1000°C. Компоненты смешивают и сжигают в вертикальном канале. Продукты сгорания обогревают через стенку садку шихты (пирог), проходят по перекидному каналу, опускаются по другому вертикальному каналу и поступают в регенераторы. Из регенераторов газы с температурой 300–400°C уходят в дымовую трубу. Первые регенераторы охлаждаются, вторые – нагреваются. Через 20 мин – перекидка.

В камере коксования процессы идут в 5 стадий: сушка, начальная стадия разложения, пластическое состояние, образование полукочка и образование кокса. Нагрев пирога симметричен относительно вертикальной оси. Скорость 50 мм/ч. Сначала выделяются пары воды, свыше 350°C – разложение угля и выделение летучих, образующих коксовый газ, 350–500°C – шихта переходит в пластическое состояние, 500–1000–1100°C – образование кокса. Все эти слои движутся с краев пирога к центру и когда весь пирог превращается в кокс, процесс заканчивается.

Раскаленный коксовый пирог 1000°C выталкивается в открытую емкость и начинает гореть. Для тушения его заливают водой в тушильных башнях. Влажный кокс ухудшает работу ДП.

Пар, потребляемый на технологические нужды 0.4–0.8 МПа, и для инъекции угольной пыли, для пневмотранспорта коксовой пыли 1.1–1.6 МПа. Удельный расход пара на т 6% вл. кокса 0.93–1.25 ГДж/т.

На 1 т коксовой шихты получают 750 кг кокса, 140–175 кг (около 300 м³) коксового газа, 25–32 кг смолы, 6–12 кг бензола, 2.2–3 кг аммиака (табл. 9).

Таблица 9

Тепловой баланс коксовой печи

<i>Приход</i>	<i>кДж/кг</i>	<i>%</i>	<i>Расход</i>	<i>кДж/кг</i>	<i>%</i>
Тепл. сгор. отоп. газа	2470	95.5	Теплота кокса	1130	43,7
Энтальп. отоп. газа	9.8	0.37	Теплота коксового газа	843	32.6
Энтальпия воздуха	19.7	0.76	Прод. сгорания	369.8	14.3
Энтальпия шихты	26.8	1.04	Потери тепла	243.2	9.4
Тепл. гор. кокс. газа	60	2.83		2586	100
	2586	100			

В УСТК наряду с утилизацией теплоты – повышение качества кокса. Использование кокса сухого тушения позволяет снизить на 2.5% удельный расход в ДП. Сухое тушение позволяет сократить период коксования на 1 ч.

Мокрое тушение

С раскаленным коксом уносится 38–43% теплоты. Кокс имеет температуру 1000–1100°C. Для предотвращения горения необходимо снизить его температуру до 200–250°C. На кокс через форсунки подается вода 4–5 м³/т кокса. Во время тушения часть воды испаряется 10–15%, одна часть остается в коксе, повышая его влажность на 3–5%, другая остается в оборотном цикле. При тушении водой вместе паром выделяются фенолы, сернистые соединения и другие вредные вещества.

Коксовый газ

С газом уносится 32–35% подведенной теплоты. Температура газа 650–750°C. Газ поступает в газосборник, где охлаждается водой до 85–90°C и далее в первичные холодильники, охлаждаясь до 28–30°C.

Коксовый газ с температурой 700°C проходит в межтрубном пространстве холодильников сверху вниз и охлаждается циркулирующей в трубах водой.

Часть смолы, содержащаяся в газе, конденсируется. Отработанный газовый конденсат стекает в нижнюю часть холодильников и с помощью гидрозатворов поступает в сборники газового конденсата. Часть конденсата насосом подается на орошение холодильников, а остальное на осветление. Орошение холодильников смолосодержащим конденсатом позволяет устранить отложения нафталина, смолы и твердых частиц на охлаждающей поверхности. Расход охлаждающей воды 0.024–0.032 м³/м³ газа, $\Delta t = 14\text{--}18^\circ\text{C}$.

В дальнейшем из газа извлекают серу, аммиак, бензол.

Коксовый газ: H₂ – 55–60%, CH₄ – 20–30%, CO – 5–7%, CO₂ – 2–3%, N₂ – 4%, O₂ – 0.4 – 0.8%. Q_{рн} = 17.5 МДж.

Ядовит и взрывоопасен, пределы 6–30%. Выход газа около 300 м³/кг

Кокс – готовый продукт процесса коксования, он выдается из печи при температуре 1000–1100°C. Физическое тепло 1 т раскаленного кокса эквивалентно 50 кг условного топлива. Охлаждение кокса может производиться мокрым способом – водой и сухим – инертными газами. При мокром тушении содержащееся в коксе физическое тепло полностью теряется с водяным паром атмосферного давления. Сухое тушение кокса производится в ус-

тановках тушения (УСТК) инертными газами, циркулирующими в контуре камера тушения – котел-утилизатор. При сухом тушении используется до 70% тепла раскаленного кокса. Удельный выход пара составляет 0,4 т/т кокса.

3.4. Энергетика доменного производства

Доменное производство является наиболее крупным потребителем энергоресурсов, ~50% топлива, потребляемого в металлургии.

Доменные печи объемом 2000–5000 м³ выплавляют 4000–9000 т чугуна в сутки, расход кокса 500–400 кг/т. Следовательно 4000–9000 т чугуна – 2000–4500 т/сут. кокса.

Сырье доменной плавки: агломерат, флюсы.

Энергоносители: кокс, горячее дутье, кислород, природный газ, другие энергоносители (коксовый газ, уголь, восстановительные газы).

Процесс плавки в доменной печи в значительной степени является энергетическим процессом.

Технологические операции

В доменную печь сверху загружают агломерат, окатыши, кокс послойно, образуя шихту.

Подогревают воздух до температуры 1200–1300°C в регенеративных воздухонагревателях. Отопление: доменный газ + воздух. Максимальная температура 1400°C. Производительность – 4500–7000 м³/мин.

В дутье добавляют кислород до 180 м³/т чугуна.

К дутью добавляют природный газ до 120 м³/т чугуна.

Процесс ведут под повышенным давлением (около 2 атм на колошнике).

Столб шихты и кокса в ходе плавки опускается вниз и нагревается до 1500–2000°C.

Оксиды железа восстанавливаются, кислород из шихты переходит в газ.

Железо плавится и по коксовой шахте сливается вниз, в ванну.

Коксовый столб плавает в ванне чугуна.

Железо насыщается углеродом до предела 4–6%.

Кокс с температурой 1500°C подходит к фурменным зонам, где подается обогащенный воздух с температурой 1200°C.

Развиваемая температура 1800–2000°C. Температура не очень высокая, так как атмосфера требуется восстановительная.

Отсюда – высокая энергоемкость доменной плавки.

Температура газов 1600–2300°C; 35–45% CO; 1–12% H₂; 45–65% N₂ – рабочее тело ТД процесса.

Основная энергетическая задача: плавление высокой температурой железа, восстановление железа из оксидов.

Основное энергетическое противоречие ДП: высокая температура при высоком восстановительном потенциале. Именно для этого применяют подогрев кокса до 1500°C и дутья до 1200°C.

У фурм ДП возникают очаги горения (окислительные зоны), в которых вихревое движение газа приводит к циркуляции кусков кокса.

Подача природного газа снижает температуру горения у фурм, но заменяет кокс, снижает его расход.

В шахте печи – противоток металлошихты, кокса и газов дутья. Чугун и шлак периодически выпускают из нижней части печи.

Из верхней части печи непрерывно отводится доменный газ: температура 350–150°C, состав: 12–20% CO₂; 20–30% CO; 0.5% CH₄; 1–4% H₂; 55–58% N₂. Теплота сгорания 3.6–4.6 МДж/ м³ (850–1100 ккал/ м³), температура горения 1400–1500°C.

Источниками вторичных энергоресурсов являются: доменный газ 46.5%, горячий чугун 5%, шлак 4.8%, охлаждающая вода 7.0%. Эти статьи превышают 65% тепла, внесенного в качестве топлива. На 1 т кокса образуется 5000 м³ газа. Доменный газ используется для отопления доменных воздухонагревателей, коксовых, мартеновских и нагретельных печей и котельных установок.

Газ на выходе очищают в три стадии: грубую, полутонкую и тонкую. Грубая очистка осуществляется в пылеуловителях сухим способом с 10–30 до 1–3 г/ м³.

Полутонкая очистка осуществляется мокрым способом в скрубберах с 1–3 до 0.1–0.8 г/ м³.

Тонкая очистка осуществляется в электрофильтрах, дезинтеграторах, тканевых фильтрах с 0.1–0.8 до 0.005–0.01 г/ м³.

Корпус ДП охлаждается холодильниками, энергоноситель – вода. Два типа: жидкостно и паровой смесью (испарительное охлаждение). Печь покрыта снаружи сварными металлическими кессонами (холодильниками), в которых циркулирует вода. Средний температурный перепад воды 7–8°C (max 10–12°C). В связи с таким низким перепадом требуются большие расходы воды: для ДП 2400 м³ – 3320 м³ воды в ч, а с учетом вспомогательных объектов печи – до 4600 м³/ч (1.5–1.6 м³/м³ воды на печь) – проектное. Отсюда сооружение водоводов большого диаметра, мощных водозаборных средств, оборудования для перекачки, охлаждения и очистки большой массы оборотной воды.

ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Доменное производство обладает развитыми энергосистемами, основная задача которых – снабжение доменного процесса энергоносителями, отвод, охлаждение и очистка газов и воды. В число этих энергосистем входят:

1. Система подготовки и подачи воздушного дутья.
2. Система подачи природного газа.
3. Система подачи водяного пара.
4. Система подачи воды.
5. Система отвода колошникового газа.

Система подачи воздушного дутья:

1. Паровоздуховодная электростанция.
2. Газопроводы холодного сжатого дутья.
3. Группы воздухоподогревателей (кауперов).

Система отвода и очистки ДГ

Доменный газ – финальный газообразный продукт ДП.

Состав ДГ: $\text{CO}=23\text{--}30\%$; $\text{CO}_2=16\text{--}22\%$; $\text{H}_2=5\text{--}11\%$; $\text{H}_2\text{O}=3\text{--}7\%$; $\text{N}_2=45\text{--}55\%$; $t=60\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$.

Из слоя шихтовых материалов, загружаемых в ДП сверху, ДГ выносит пыль (кокс и железорудное сырье) до 1 мм. Содержание пыли в ДГ достигает $15\text{--}30\text{ г/м}^3$.

В современных ДП с расходом кокса $400\text{--}500\text{ кг/т}$ теплота сгорания ДГ $3000\text{--}3400\text{ кДж/м}^3$.

Системы ВЭР доменного производства

Доменное производство – самый мощный процесс, на долю которого приходится $2/3$ всей энергии черной металлургии.

Исходными материалами являются железорудные материалы в виде агломерата, окатышей, руды; топлива в виде кокса, природного газа; окислители.

Продукцией доменного производства является чугун (1500°C), шлак (1500°C), доменный газ ($200\text{--}400^\circ\text{C}$). Процесс идет при повышенном давлении $2.5\text{--}3.5\text{ ат.}$ (табл. 10).

Из анализа теплового баланса видно, что ВЭР является доменный газ, который уносит 50% энергии. Этот ВЭР охлаждается, очищается от пыли и поступает в общезаводские газопроводы. ДГ. Теплота сгорания $\sim 4000\text{ кДж/м}^3$, температура сгорания $\sim 1500^\circ\text{C}$. Степень использования $\sim 95\%$ (химической энергии).

Таблица 10

Тепловой баланс доменной плавки

<i>Приход</i>	<i>%</i>	<i>Расход</i>	<i>%</i>
Химич. энергия кокса	73,2	Хим. энергия ДГ	43,5
Физич. теплота дутья	13,2	Диссоц. оксидов	31,4
Теплота шлакообразования	1,6	Потенц. охл. ВД и ОС	7,0
Хим. энергия ПГ	12,0	Прочие потери	5,3
		Физич. тепл. чугуна	5,0
		Физич. тепл. шлака	4,8
		Физич. тепл. ДГ и пыли	3,0
Итого	100	Итого	100

Потери с охлаждающей водой и в окружающую среду уносят около 7% доменной плавки. Нагретая вода 40–45°C затрудняет использование, практически не используется.

Физическая теплота чугуна 5% выносит из теплового баланса 1500°C. Теплота практически полностью используется в сталеплавильном производстве.

Физическая теплота шлаков выносит 4.7% теплоты, температурный потенциал 1500°C. Теплота не используется. Свыше 90% доменных шлаков гранулируются с получением строительных материалов, граншлака. Шлак выливают в воду, он растрескивается с образованием гранул 3–5 мм.

Физическая теплота ДГ и пыли 3% выносит ДГ. Температурный потенциал 200–400°C. ДГ очищается в мокрых газоочистках.

Теплота отходящих газов доменных воздушнонагревателей. Температурный потенциал 200–400°C, уносят 20–30% энергии для подогрева доменного дутья. В настоящее время эта теплота практически не используется.

Энергия избыточного давления ДГ. $P=2-3$ ати. Из них может быть использовано около 200 кПа в турбинах на выработку электроэнергии.

Доменный газ

ДГ является основным вторичным ресурсом доменной плавки, а также горючим ресурсом с $Q^p_n=3.6-4.6$ МДж/м³.

Состав: 20–30% CO; 0.5% CH₄; 55–58% N₂.

Отходящий газ имеет избыточное давление до 2.3 ат. Для использования этого вторичного ресурса необходимо:

- очистить от пыли;
- понизить давление.

Все эти операции осуществляет система ВЭР – отвода, очистки и охлаждения ДГ.

После охлаждения, очистки доменный газ передается в систему заводских газопроводов ДГ, которая находится в ведении службы главного энергетика.

ДГ используется: в системах нагрева слитков металла в нагревательных колодцах перед слябингами и блюмингами в процессах обжига материалов.

Система ДГ включает в себя:

- очистку от пыли;
- устройства понижения давления;
- газопроводы ДГ;
- очистка газа 3 стадии: грубая, полутонкая, тонкая.

Грубая очистка в пылеуловителях сухим способом от 30 до 1.3 г/м^3 .

Полутонкая очистка мокрым способом осуществляется в скрубберах, при этом содержание пыли снижается от 1–3 до $0.1\text{--}0.8 \text{ г/м}^3$.

Тонкая очистка осуществляется в электрических фильтрах, дезинтеграторах, тканевых фильтрах. Содержание пыли падает от $0.1\text{--}0.8$ до $0.005\text{--}0.01 \text{ г/м}^3$.

На стадии очистки в мокрой очистке вся теплота ДГ теряется с водой.

Последним элементом системы является дроссельная группа, в которой происходит понижение давления 2.3–0.5 ати. После всей обработки ДГ поступает в распределительные сети для использования в других цехах и производствах.

Шлак доменный

В ДП образуется значительное количество шлака 300–500 кг/т. Температура шлака $1300\text{--}1600^\circ\text{C}$, температура кристаллизации шлака $900\text{--}1000^\circ\text{C}$. Доля в тепловом балансе 4.8%.

В практике ДП используют массу шлака на производство стройматериалов (невысокого качества).

Раскаленный доменный шлак при $t=1400\text{--}1600^\circ\text{C}$ выливается в объем воды, где он резко охлаждается, растрескивается на мелкие гранулы 3–5 мм и образует граншлак.

Вода нагревается, но не до кипения. Теплота воды не используется. Расход воды до $3 \text{ м}^3/\text{т}$ шлака. Процесс периодический.

Теплота шлака используется на увеличение фазовой поверхности. Полученный граншлак замещает щебень, что малоэффективно.

Чтобы повысить эффективность надо, чтобы он замещал более ценный материал. По составу доменного шлака имеются 2 аналога материала: керамика и цемент (энергоёмкостью до 250 кг.у.т/т).

Корректировкой состава доменного шлака можно получить керамику и цемент.

Эти два направления использования ВМЭР и позволяют повысить эффективность.

Шлак вываливают в воду, нагретую до 55°C. Грязная вода поступает в теплообменник, сетевую воду нагревают до 85–90°C в шлакогрануляторе. Теплота доменного шлака используется, но при этом температурный потенциал 1500°C трансформируется до 95°C.

Использование избыточного давления ДГ

Турбина для выработки ээ (1962, ММК).

Среднее избыточное давление 0.230 МПа. Давление доменного газа в потребительской сети 0.01 МПа. Таким образом (0.230–0.01)=0.21 МПа может быть использовано.

Устройство: газовая утилизационная бескомпрессорная турбина (ГУБТ). Впервые ГУБТ построена на ММК в 1962 году.

После ДП газ очищается и охлаждается до ~30°C, Р ~0.230 МПа.

При работе на таких параметрах происходит снижение температуры ДГ за турбиной ниже 0°C и обмерзание лопаток, что может привести к выходу из строя.

Чтобы избежать обмерзания, ДГ перед подачей в турбину подогревают в две ступени: в регенеративном теплообменнике или в поверхностном теплообменнике за счет сжигания отработавшего ДГ.

На турбину подается ДГ с параметрами 450°C и 0.220 МПа.

В турбине ДГ срабатывается до параметров 300°C и 0.114 МПа.

Физическая теплота отработавшего газа используется в регенеративном подогревателе.

Проведены исследования по переводу ГУБТ на работу на холодном ДГ с организацией непрерывной или периодической обмывки водой частей, подвергающихся наиболее интенсивному загрязнению (в основном – это неподвижные части на входе).

При работе на холодном ДГ: газ после мокрой ГО является насыщенным, при расширении в турбине выделяется влага (и скрытая теплота конденсации). Процесс расширения идет по политропе с подводом теплоты, что сильно повышает температуру газа на выходе турбины.

При Р1=0.3 МПа и t1=30°C, t2>0°C обмерзания не происходит.

Обмывка холодной водой входной и проточной частей ГУБТ обеспечивает непрерывную работу турбины в течение всей кампании.

На ряде заводов ГУБТ работают на холодном ДГ с водяной обмывкой.

3.5. Производство стали

В сталеплавильном производстве поступающий чугун с содержанием растворенного углерода около 4,5% обрабатывается различными окислителями для понижения содержания углерода ниже 2%. При такой обработке, кроме чугуна окисляются также и другие элементы из состава чугуна (табл. 11).

Таблица 11

Состав передельного чугуна:

<i>Si</i> , %	<i>Mn</i> , %	<i>P</i> , %	<i>S</i> , %	<i>C</i> , %
0.51–0.90	0.5–1.5	0.15–0.30	0.02–0.04	3.8–4.8

Окисление примесей сопровождается значительными экзотермическими эффектами, что приводит к повышению температуры жидкого металла от начальной до (примерно) 1600°C (табл. 12, 13).

Таблица 12

Тепловые эффекты охладителей ванны

Лом	Железная руда	Известняк
1.38 кДж/кг	5.5 кДж/кг	5.87 кДж/кг

Удельный расход кислорода 45–50 м³/т.

Интенсивность продувки 4–5 м³/(т*мин).

Время кислородной продувки 10–15 мин.

Таблица 13

Технологический цикл конвертерной плавки

1. Завалка лома и заливка чугуна	10 мин
2. Продувка кислородом	17 мин
3. Повалка, отбор проб	6 мин
4. Слив металла и шлака, осмотр футеровки	9 мин
ИТОГО	42 мин

В зависимости от набора источников энергии и окислителей, производство стали осуществляется тремя основными способами.

Теплота окисления элементов ванны кислородом

[Si]+{O ₂ }	(SiO ₂)	→	Q _{Si} = 26 – 25.4	кДж/кг
[Mn]+{O ₂ }	(MnO ₂)	→	Q _{Mn} = 6.4 – 6.3	кДж/кг
[Fe]+{O ₂ }	(FeO)	→	Q _{Fe} = 4.1 – 4.0	кДж/кг
[C]+{O ₂ }	{CO}	→	Q _C = 11.3 – 11.1	кДж/кг
[C]+{O ₂ }	{CO ₂ }	→	Q _C = 33.1 – 32.0	кДж/кг
2*[P]+5/2*{O ₂ }	(P ₂ O ₅)	→	Q _P = 19.8 – 16.5	кДж/кг

Температура в зоне реакции 2500°C.

В мартеновском производстве основным источником энергии является газовое топливо с подогретым воздухом, а окислителем примесей – продукты сгорания этого топлива.

В кислородно-конвертерном производстве стали основным и единственным источником энергии является углерод чугуна с продуваемым кислородом.

В электросталеплавильном способе основным источником энергии является теплота электрической дуги, а окислителем – кислород.

В настоящее время мартеновский способ производства стали имеет незначительное применение.

Энергетическая система мартеновского производства стали

Сырьё мартеновской плавки: чугун, лом, руда. Энергоносители : ПГ, КГ, ДГ, мазут, воздух, O₂ .

Расход условного топлива: 90–100 (кг у.т./т стали).

Удельный расход кислорода: 50–60 (м³/т стали).

Продолжительность плавки: 9–10 ч.

Обогащение воздуха кислородом: 26–28%, добавление мазута: 20–30% без O₂; 10–15% – с O₂ .

Температура шлака 1650°C, факела – 1750°C.

Технологические операции

Загружают на подину шихту: стальной лом, железную руду, известняк, заливают чугун.

Подогревают воздух до 1200–1250°C. Сжигают топливо с воздухом в настильном факеле.

Добавляют в факел кислород, в газ – мазут. Плавят шихту при 1450–1500°C, нагревая ванну.

Наводят шлак добавками извести. Раскисляют сталь добавками ферромарганца.

Легируют сталь. Разливают в ковши.

Процессы в мартеновской плавке

Шихта расплавляется и образует два слоя в ванне.

В факеле содержится связанный кислород в CO_2 и H_2O .

Газовая фаза окисляет $\text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3 + [\text{C}] - \text{CO}$.

Кислород через слой шлака поступает в ванну, окисляет углерод до CO .

CO образует пузырьки, которые поднимаются наверх, проходят слой шлака и выходят в газовую фазу. Ванна как бы кипит. Отходящие газы обогащаются CO .

Температурный уровень процессов 1600°C .

В мартеновском процессе, в отличие от конвертерного, теплоты окисления примесей недостаточно для проведения плавки, поэтому печь отапливается. Топливо – ПГ, мазут, КГ, ДГ.

Процесс возможен только при нагреве воздуха до $1000\text{--}1200^\circ\text{C}$. Это – основная заслуга Сименса – регенеративный подогрев воздуха (табл. 14, 15).

Таблица 14

Материальный баланс железа на 100 кг Fe

Приход	кг	%	Расход	кг	%
1. Железо чугуна и лома	95–97	89–92	1. Железо конечного металла	102–104	97–98
2. Железо твёрдых ок-лей (руда, агломерат)	8–12	7,5–11	2. Железо шлака в виде оксида	1,5–2,5	1,5–2,5
3. Железо флюсов	0,1–0,2	0,1–0,2	3. Железо шлака	0,4–0,7	0,4–0,7
			4. Выбросы		
			5. Железо уносимое газами	<0,1	<0,1

Таблица 15

Тепловой баланс мартеновской плавки

Приход	%	Расход	%
1. Тепло жидкого чугуна	0–12	1. Нагрев стали и шлака	18–25
2. Теплота реакций окисления.	8–17	2. Нагрев CO и CO_2 выдел. из ванны	1,5–2
3. Теплота сгорания топлива	45–60	3. Нагрев и разложение железной руды и известняка	1,0–10,0
4. Физическая теплота подогретого топлива и воздуха	26–32	4. Теплота отходящих газов	45–60
		5. Потери теплоты (с охл. водой), (через кладку)	(15–25) (5–15) (4–6)

В рабочем пространстве коэффициент избытка окислителя >1 , отсюда избыток кислорода. Окислительная атмосфера печи: H_2O , CO_2 и O_2 . Кислородосодержащие газы проникают через шлак в жидкую ванну, окисляют C , Si , Mn , Al . Газообразные продукты окисления CO поднимаются, перемешивая ванну. Теплота стали и шлака не используется.

Конвертерное производство стали

Не имеет топливного источника энергии, поэтому количество лома определяется содержанием углерода в чугуна. Доля лома – 25–28%, производство мощное, энергоемкое (табл. 16).

Чугун – 75%, лом – 25%.

Таблица 16

Тепловой баланс

Приход	%	Расход	%
Теплота жидкого чугуна	49	Тепло готовой стали	71,7*
Теплота реакции окисления	51	Тепло шлака	13,0
		Отход. газы	8,3
		Потери с металлом	3,5
		Прочие неучтенные потери Q	2,0
		Потери с охл. водой	1,5
Итого	100	Итого	100

*Теплота стали прямо не используется.

Теплота шлака не используется. Конвертерные газы имеют температуру до $1700^\circ C$, запыленность 350 г/м^3 , унос плавкий.

Газы поступают в охладители конвертерных газов – водоохлаждающие поверхности – экран с принудительной циркуляцией. Основная задача – охладить конвертерные газы перед мокрой газоочисткой.

Далее по ходу газов устанавливаются котлы-утилизаторы для получения пара.

После КУ – мокрая газоочистка, скруббер Вентури. После газоочистки с температурой окружающей среды подаются на свечу и дожигаются.

Физическая теплота КГ и химическая энергия в нем находятся в примерном соотношении 20–80%. Система ВЭР конвертерного производства занимает до 30% всех капитальных вложений цеха.

Использование отходящего газа

На стадии продувки кислородом в кислородных конвертерах вырабатывается значительное количество низкокалорийного газа с теплотой сгорания 9428 кДж/м^3 (2250 ккал/м^3). Этот газ, имеющий температуру нагрева 1260°C и содержащий до 90% окиси кислорода, образуется в результате сжигания углерода в чугуне чистым кислородом. Оценка его выхода по теплу составляет около $0,835 \text{ ГДж}$ ($28,5 \text{ кг у.т.}$) на 1 т стали в слитках. Это свидетельствует о том, что общие ресурсы энергии составляют 2–3% от общего расхода энергии на производство стали в черной металлургии.

В США отходящие из кислородного конвертера газы направляются в камин. В существующей в настоящее время практике эти горячие газы, самопроизвольно сгорающие в газоотводящем камине, охлаждаются, очищаются и затем выпускаются в атмосферу. В прошлом из-за низких затрат на топливо утилизация тепла не считалась экономически эффективной. Однако в Европе и Японии, где затраты на топливо всегда были относительно высокими, отходящие газы кислородных конвертеров отводились в камин и сжигались в котлах-утилизаторах, вырабатывающих технологический пар. Использование этих отходящих газов приводило также к улучшению охраны окружающей атмосферы.

В Японии уже сконструирована газоотводящая система с закрытым камином для того, чтобы устранить загрязнения, возникающие в результате продувки ванны конвертера кислородом.

Азот используют для разбавления и продувки газов в системе, чтобы предотвратить воспламенение и взрыв отходящих газов и герметизировать систему против подсосов в нее воздуха. Еще одна система отвода кислородно-конвертерного газа без его дожигания в камине была разработана во Франции НИИ черной металлургии (ИРСИД) и фирмой КАФЛ. Основное различие между этими двумя системами заключается в том, что в японской системе в качестве газа для продувки системы используют азот, в то время как во французской системе используют смесь азота и двуокиси углерода, которая изолирует горючие газы от воздуха, подсасываемого в систему вне периодов продувки и во время выпуска плавки.

Камины японской конструкции для отвода кислородно-конвертерного газа по методу ОГ в настоящее время установлены в США в трех кислородно-конвертерных цехах на заводах фирм «Армо стил», «Инлэнд стил», «Юнайтед стэйтс стил» и один сооружается в Канаде. Во всех установках США отводимые газы сжигаются в факелах, но уже предусмотрена установка в этих системах оборудования для отвода и хранения кислородно-

конвертерного газа. Во всем мире около 100 кислородных конвертеров, главным образом, в США, Европе и Японии, имеют системы с закрытыми каминами для отвода кислородно-конвертерных газов без дожигания в камине.

Системы отвода кислородно-конвертерного газа без дожигания в камине позволяют, по уже имеющимся сообщениям, получать 60 м^3 кислородно-конвертерного газа на 1 т стали. Этот газ имеет низкое содержание серы и теплоту сгорания 9428 кДж/м^3 (2250 ккал/м^3), что позволяет получить $0,523 \text{ ГДж}$ тепла ($17,8 \text{ кг у.т.}$) на 1 т стали. Теплоту сгорания кислородно-конвертерного газа, помимо конвертерного цеха, можно использовать для выработки пара, подогрева лома для кислородных конвертеров и подачи дополнительного тепла для сталеплавильного процесса.

Выработка пара

Сжигание отходящего газа в каминах сопровождается паровым или водяным охлаждением. В связи с тем, что на большинстве металлургических предприятий пар является полезным продуктом, некоторая часть тепла от сжигания отходящих газов должна утилизироваться для производства пара. Это может осуществляться путем передачи тепла к воде, охлаждающей камин, или путем теплопередачи лучеиспусканием. При выработке такого пара утилизируемая из отходящих газов энергия по расчетам равна $167\text{--}278 \text{ МДж}$ ($5,7\text{--}9,5 \text{ кг. у.т.}$) на 1 т стали. Это составляет только около 20–30% от всего физического тепла нагрева и химического тепла, содержащегося в кислородно-конвертерном газе.

Более эффективным средством использования тепла кислородно-конвертерного газа будет установка котлов-утилизаторов над кислородными конвертерами. При к.п.д. котла, равном 80%, станет возможным утилизировать более 556 МДж тепла (19 кг у.т.) на 1 т стали. Однако при существующих ценах на энергию в США может оказаться неэкономичным повышать к.п.д. выработки тепла путем установки котлов-утилизаторов для увеличения того, что в настоящее время достигается при использовании водоохлаждаемых или пароохлаждаемых каминов.

Подогрев лома

Доля лома в шихте кислородных конвертеров обычно составляет 25–30%. Так как увеличение количества лома в шихте дает значительную экономию энергии, были проведены различные эксперименты по подогреву лома как внутри, так и вне кислородных конвертеров.

Потенциальным источником энергии для подогрева лома является кислородно-конвертерный газ. Одним из методов утилизации этого отходящего газа является его сбор и отвод с помощью закрытой системы камина и использование в качестве топлива для подогрева лома в отдельном агрегате до загрузки лома в кислородный конвертер. Однако из-за высокой стоимости отвода кислородно-конвертерного газа с помощью закрытого камина, подогрев лома с использованием этого газа, вероятно, не получит широкого применения в ближайшем будущем.

Другой метод утилизации кислородно-конвертерного газа для подогрева лома был исследован Горным бюро США. В ходе этого исследования отходящие газы, вырабатываемые во время продувки расплавленного чугуна и загруженного лома, пропускали через стационарный слой измельченного и подготовленного автомобильного лома. Подогревали лом, доля которого составляла 22–40% от массы металлической шихты кислородного конвертера. Во время продувок конвертера достигались средние температуры нагрева слоя 621–899°C, что обеспечивало подачу примерно 44% энергии, необходимой для плавления. Общее количество тепла, утилизируемого на подогрев лома, составляло 13.4–100.2 МДж (0.46–3.4 кг у.т.) на 1 т. Эти исследования в настоящее время расширены с учетом изучения эффективности теплопередачи, влияния плотности лома и возможности обеспыливания. Если они окажутся успешными, то, вероятно, будут проведены более крупномасштабные эксперименты. К этому времени подогрев лома, по-видимому, будет иметь наиболее благоприятное значение для утилизации энергии кислородно-конвертерного газа.

3.6. Непрерывная разливка

Большую часть стали, производимой в промышленности, разливают на слитки, дают им охладиться и затем вновь нагревают перед прокаткой на готовый прокат. Непрерывная разливка имеет потенциал для экономии топлива, так как она устраняет стадию разлива в изложницы, а также увеличивает выход годного на 10% по сравнению с обычной разливкой.

Имеются три типа установок непрерывной разливки. Во всех этих установках жидкую сталь заливают в промежуточное устройство из ковша. Скользящие затворы позволяют жидкой стали поступать в кристаллизатор и охлаждающую камеру. На поверхности жидкой стали, по мере того, как она перемещается через кристаллизатор, образуется твердая корочка. В результате термической

усадки корочка отделяется от кристаллизатора, и вследствие низкого коэффициента диффузии жидкой стали затвердевание сердцевины в кристаллизаторе происходит очень медленно.

Установки непрерывной разливки различают как по форме сечения кристаллизатора, так и по способу изменения положения затвердевающего сляба или сортовой заготовки из вертикального в горизонтальное. В установке непрерывной разливки вертикального типа промежуточное устройство требуется располагать по крайней мере на расстоянии 21 м от уровня пола для того, чтобы обеспечить завершение процесса затвердевания. В установке этого типа затвердевшая заготовка переводится в горизонтальное положение либо путем предварительной ее резки на мерные длины и их кантования на 90° , либо пропусканием горячей мягкой через ряд последовательно расположенных роликов. В установках радиального типа с криволинейным кристаллизатором расстояние между промежуточным устройством и полом должно быть около 6 м, а кристаллизатор и камера охлаждения изогнуты по дуге большого радиуса. Радиальные установки удобнее тем, что здесь непрерывную заготовку сгибают, когда сталь еще только начала затвердевать и находится скорее в жидком, чем в частично затвердевшем состоянии. В таких заготовках реже возникают трещины на поверхности и в углах в результате совместного действия напряжений при изгибе и термических напряжений.

Температуру жидкой стали следует тщательно контролировать в ковше и промежуточном устройстве, чтобы обеспечить жидкотекучесть стали и минимальный расход топлива. Обычно температура выпускаемой из сталеплавильной печи стали несколько выше для непрерывной разливки стали, чем для разливки в изложницы. Большое внимание уделяется предотвращению приваривания слябов или других непрерывных заготовок по мере их затвердевания к стенкам кристаллизатора с тем, чтобы избежать прорывов трещины в корочке заготовки.

В США имеется примерно одинаковое число установок с криволинейными и прямолинейными кристаллизаторами. С 1971 года появилось несколько больше слябовых установок с криволинейным кристаллизатором и сортовых установок с прямолинейным кристаллизатором. Установки с прямолинейным кристаллизатором как слябовым, так и квадратным сечением, имеют тенденцию к большему росту мощности, чем установки с криволинейным кристаллизатором.

Непрерывная разливка имеет значительный потенциал для экономии топлива на различных стадиях обработки стали. Кроме экономии топлива, при самой обработке стали может быть снижен

и расход электроэнергии, вследствие более высоких значений выхода годного металла при непрерывной разливке по сравнению с обычной разливкой в изложницы. Фирма «Термоэлектрон» подсчитала, что суммарная экономия энергии составляет около 1.56 ГДж (53 кг у.т.) на 1 т стали. Это составляет около 5.5% всего топлива, расходуемого по всему металлургическому циклу на 1 т конечной продукции.

Несмотря на то, что непрерывная разливка обладает многими преимуществами, имеется и ряд ограничений, которые сдерживают ее распространение в США:

1) некоторые высоколегированные стали очень сложно разливать непрерывным способом, например, кремнистые стали;

2) установки непрерывной разливки стали требуют тщательного контроля химического состава металла, температуры и хода отдельных технологических операций;

3) непрерывная разливка ограничивает сортамент металла;

4) процесс требует более длительного периода времени для освоения оборудования и подготовки обслуживающего персонала;

5) действующие в настоящее время предприятия уже используют разливку в изложницы и либо нет необходимости в замене их, либо требуются значительные средства для замены.

В последних публикациях указывается, что в США на 109 заводах из 158 не используются пока установки непрерывной разливки стали. Наибольшее количество установок непрерывной разливки стали приходится на небольшие заводы, где отливаются квадратные заготовки.

Несмотря на то, что номинальная мощность непрерывной разливки по отношению к общей номинальной мощности США по стали является низкой (около 11%), еще более важным фактом является то, что годовое производство непрерывно-литой заготовки в 1973 году составляло только 5.5% от общего производства стали в стране. Это указывает на то, что только около половины номинальной мощности непрерывной разливки в США используется в настоящее время. В противоположность этому в 1973 году в ФРГ и Японии разливали непрерывным способом около 17 и 21% своей стали соответственно.

Основными предприятиями, которые будут применять непрерывную разливку стали, являются небольшие заводы. На новых металлургических заводах полного цикла, вероятно, также будет применяться непрерывная разливка, хотя и имеется всего несколько программ строительства таких заводов.

3.7. Прокатное производство

Экономия энерго- и материальных ресурсов нагревательных и термических печей

В нагревательных печах (даже одного и того же типа) удельный расход тепла значительно различается, ГДж/т (кг у. т./т):

Методические печи..... 1,5 (51)–3,5 (120).

Печи скоростного нагрева..... 3,5 (120)–6,0 (205).

Камерные кузнечные печи..... 3,15 (120)–8,0(273).

В среднем количество неиспользованной энергии в методических печах составляет 1,5–2,0 ГДж/т (51–68 кг у.т./т), в других нагревательных печах 3–6 (102–205).

На расход тепла в нагревательных печах основное влияние оказывают: температура и количество продуктов сгорания, подогрев компонентов горения, температура посяда металла, потери тепла с охлаждающей водой и др. В прокатных цехах до 50 кг у.т./т и более тепла можно сэкономить путем горячего посяда металла. Экономия топлива за счет рекуперации и обогащения воздуха кислородом зависит от температуры отходящих от печей газов.

Например, с введением подогрева воздуха до 750°C при температуре отходящих газов 90°C расход природного газа снизится на 30–32% по сравнению с режимом без подогрева, при 1400°C – почти на 50%. При температуре подогрева воздуха 500°C экономия газа при тех же температурах отходящих газов составила бы соответственно 20 и 30%. Для коксового газа экономия топлива примерно такая же, как и для природного газа. В случае доменного газа при температуре продуктов сгорания 900°C и температуре подогрева воздуха 500 и 750°C экономия топлива составит соответственно 34 и 40%, при 1400°C повышение температуры подогрева воздуха с 500 до 750°C позволит сэкономить 38–40% топлива. С увеличением коэффициента расхода воздуха влияние его подогрева на эффективность использования топлива растёт.

Окончательный выбор температуры подогрева воздуха (газа) уточняется на основе проектно-конструкторских расчетов и технико-экономического анализа, выполненных с учетом стойкости материала теплообменников и технологии нагрева металла. Для печей прокатных цехов эта температура при соответствующем режиме сжигания топлива (для подавления NOx) должна составлять 600–800°C. Как правило, более низкая температура подогрева воздуха выбирается не по технико-экономическим соображениям или вследствие недостаточной стойкости материалов для теплообменников, а из-за их неудовлетворительной конструкции и недос-

таточного уровня автоматизации управления тепловым режимом их работы.

При высокой температуре подогрева воздуха встает вопрос об эффективности эксплуатации унифицированных котлов-утилизаторов, обычно устанавливаемых за всеми крупными печами прокатных цехов, и рассчитанных на температуру входящего в них газа 600–850°C.

С увеличением внутреннего использования тепла температура отходящих газов может оказаться ниже 600°C.

Внутреннему и внешнему использованию тепла отходящих от методических печей газов посвящено много работ, в которых отмечается, что КИТ и КИЭ при комбинированном использовании тепла могут быть существенно повышены за счет утилизации тепла в котлах с понижением температуры газов до 200–220°C. Например, для схемы печь – рекуператор при отоплении печи коксодоменным газом с теплотой сгорания 6700 кДж/м³, температуре отходящих газов 1200°C, температуре подогрева воздуха 400°C КИТ=42%, КИЭ=22%; при использовании подогретого воздуха не в печи, а на стороне – соответственно 31 и 15%; в схеме печь – котел при той же разности энтальпий продуктов сгорания в котле, что и в рекуператоре, 31 и 15%; в схеме печь – рекуператор (воздух 400°C) – котёл, печь – котел – рекуператор и печь – I ступень рекуператора – котел – II ступень рекуператора (400°C) при одинаковой температуре отходящих газов после утилизаторов (220°C) 75 и 37%.

Из термодинамического анализа эффективности комбинированного использования тепла нельзя сделать вывод о перспективности той или иной схемы, если утилизируется одно и то же количество тела для внешнего и внутреннего теплоиспользования. За счет внешнего теплоиспользования можно повысить тепловой и эксергетический показатели безотходности почти в два раза.

Повысить КИТ до 75% и КИЭ до 37% можно было бы и за счёт только рекуперации тепла. С этой целью для рассматриваемого случая нагрева металла необходимо было бы увеличить подогрев воздуха с 400 до 1250°C или заменить его на подогрев и газа, и воздуха до 850°C. Такую температуру подогрева компонентов горения в металлических рекуператорах получить трудно (хотя есть промышленный опыт подогрева воздуха до 900°C). Потребовалась бы установка специальных металлических или керамических рекуператоров (возможно, регенераторов), что усложнило бы конструкцию и обслуживание печи. Но требуют значительных затрат и установка котла-утилизатора, строительство дымовых каналов и дымовой трубы для транспортировки больших объемов газов, строительство паропроводов от котлов к потребителям тепло-

вой энергии и т.д. При этом следует учитывать, что в нагревательных печах черной металлургии ежегодно сжигается около 10 млрд м³ природного газа, то есть повышение внутреннего (замкнутого) использования тепла отходящих газов таких печей позволит сэкономить 1–2 млрд м³ в год этого наиболее ценного газообразного топлива.

Высокая степень внутренней рекуперации тепла уходящих газов при умеренной температуре подогрева воздуха может быть достигнута за счет увеличения неотапливаемой (методической) зоны и интенсификации теплообмена в ней.

В большинстве случаев работы нагревательных печей при существующих соотношениях затрат на добычу и транспортировку природного газа и производство кислорода, применение кислорода для обогащения воздуха с целью снижения потерь тепла с отходящими газами, не дает положительного экономического эффекта, если при этом не решаются какие-то еще задачи кроме экономии топлива, например, связанные с достижением малоокислительного нагрева металла, применением менее дефицитного топлива, увеличением производительности печей за счет повышения температуры горения или решения проблемы повышения пропускной способности дымовых каналов и пр. Если принять приведенные затраты на производство 1000 м³ технологического кислорода 11 руб., замыкающие затраты на природный газ, отнесенные к 1 т условного топлива, 30 (15) руб., то положительный экономический эффект от применения 1000 м³ кислорода (без учета изменения температуры отходящих газов и производительности печи) может быть достигнут при экономии природного газа не менее 350 (700) м³.

Степень обогащения воздуха кислородом практически не влияет на удельную экономию газа, отнесенную к 1000 м³ кислорода. При максимальном принятом значении замыкающих затрат на природный газ положительный эффект от применения кислорода при холодном воздухе $n=1,1$ можно получить, если температура продуктов сгорания выше 1100°C, при подогреве воздуха до 400°C.

При росте производительности печи в случае применения кислорода экономический эффект может быть получен при существенно меньшем снижении расхода топлива. Например, при росте производительности на 10% положительный экономический эффект может быть получен при снижении расхода топлива всего на 35 (75) м³ на 1000 м³ использованного кислорода. Увеличение производительности на 10–15% при удельном расходе кислорода 7–10 м³/т стали в ряде случаев наблюдалось при нагреве металла в методических печах и колودцах.

Важные резервы повышения экономичности нагрева металла: обеспечение равномерного интенсивного нагрева; снижение температуры; нагрев по заданному температурному режиму; нагрев в контролируемых атмосферах и пр. Средства и методы, используемые для достижения качественного нагрева в каждом конкретном случае, не могут быть одинаковыми. В одних условиях для этого требуется использование печей с плоскопламенными горелками, в других – с факельно-импульсным отоплением, с применением кислорода для обогащения воздуха и т.д. Общим для всех случаев качественного нагрева металла является автоматическое управление процессом нагрева, важная и пока наименее решенная часть которого – управление атмосферным режимом в печи или управление горением топлива. Без управления режимом горения нельзя добиться ни равномерного нагрева металла, ни регламентированного взаимодействия атмосферы с его поверхностью, ни эффективного использования топлива. Вопросы поддержания атмосферного режима наиболее важны для печей с безоксидным (малоокислительным) нагревом металла перед его обработкой давлением.

Технические трудности в освоении печей безокислительного нагрева связаны прежде всего со значительно более жесткими требованиями к точности поддержания состава атмосферы, контактирующей с металлом, чем при обычном нагреве стали. Особенно трудна стабилизация состава контролируемой атмосферы в процессе регулирования температуры и на режимах холостого хода печей. Расчёты показывают, что экономический эффект от применения безокислительного нагрева стали в продуктах неполного сгорания природного газа существенно зависит от типа производства, характера и цели нагрева металла.

В прокатном производстве особенно значителен эффект от внедрения безокислительного процесса при длительном высокотемпературном нагреве, например, в таких процессах, как гомогенизирующий нагрев подшипниковых, электротехнических и лезвийных сталей. В первом и последнем случаях экономический эффект достигает 18 руб./т стали, а при учете повышения долговечности гомогенизированной подшипниковой стали только на 30 с 40 руб./т. Потери металла в окалину в случае гомогенизирующего нагрева подшипниковой стали (ее стоимость около 260 руб./т) составляют около 5%, потери при механической обработке 3%. При гомогенизирующем нагреве электротехнической стали экономический эффект может достигать 7 руб./т.

В 1985–1987 годах были проведены промышленные испытания этого нагрева. В СССР освоено несколько вариантов нагрева

различных электротехнических сталей. Один из них – высокотемпературный двухступенчатый нагрев: в печах первой ступени металл нагревают до 1150–1200°C, второй – до 1380–1400°C. В печах для высокотемпературного нагрева электротехнической стали окисляется около 5–7% стали: 1–1,5% в печах первой ступени, 3,5–4,5% в печах второй ступени.

В одной из высокотемпературных печей второй ступени производительностью 60 т/ч были осуществлены длительные испытания нагрева электротехнической стали с регламентированным окислением металла (окисление в конце нагрева до 0,5% было необходимо для удаления дефектной зоны на поверхности слэбов). Печь имела три зоны: зону дожигания газов 1, зону первичного горения 2 и зону регламентированного окисления 2а. Топливо (природный газ) и кислород подведены к зонам 2 и 2а. Отопление зоны 2 осуществляли при $\alpha=0,5$ обогащении воздуха кислородом до 50–60%.

При стабильной работе стана окисление снижалось в 5–6 раз, при простоях (из-за нарушения состава атмосферы в печи) – в 2–2,5 раза. В среднем же за период испытаний угар металла в печи снизился примерно на 2,5% (25 кг/т). Расход топлива (в горячий час) составил 40 м³/т, расход кислорода 30 м³/т.

При неизменном расходе топлива в условиях испытаний и в обычном режиме на 1 т стали дополнительно расходовалось 30 м³ технического кислорода, что соответствует 9–9,5 кг у.т./т. Энергоемкость 1 кг окисленной стали составляет около 0,7 кг у.т. (с учетом использования окалины), что при снижении окисления на 2,5% соответствует 17,5 кг у.т./т нагретого металла. С учетом расхода кислорода энергоемкость 1 т стали при безокислительном нагреве снизилась примерно на 8 кг у.т. При этом необходимо учитывать, что снижение энергоемкости произошло прежде всего за счет экономии наиболее дефицитного топлива – кокса. В условиях работы нагревательных печей может быть использован технологический кислород, энергоемкость которого существенно ниже энергоемкости технического кислорода.

В кузнечно-штамповочном производстве экономический эффект при безокислительном нагреве металла определяется не столько экономией металла от уменьшения его угара, сколько экономией от снижения затрат на брак, механическую обработку и потерь металла при ее выполнении, потерь металла в облой и затрат на штампы. Экономический эффект при стоимости стали около 400 руб./т составляет 45–55 руб./т.

При нагреве стальной стружки перед брикетированием всего до 750–700°C окисляется 16–18% металла, что резко снижает металлургическую ценность получаемых из неё брикетов. Создание

безокислительной (малоокислительной) атмосферы при такой тепловой обработке экономически безусловно выгодно, причем при нагреве до указанных температур снижение n всего до 0,8–0,98 позволяет уменьшить окисление стружки в 5–7 раз по сравнению с её нагревом в продуктах полного сгорания, содержащих свободный кислород ($n > 1,0$). На такой нагрев стружки требуется около 40 кг у.т./т. В состоянии поставки стружка содержит до 1,5% масла (15 кг/т), то есть частично нагрев ее может быть организован за счёт горения масла

В прокатном переделе значительные потери металла вызваны его обезуглероживанием в процессе нагрева. Удаление обедненного углеродом слоя приводит к потерям до 5% металла. Проблема снижения обезуглероживания при высокотемпературном нагреве стали пока не решена.

Один из путей снижения обезуглероживания заготовок предполагает нагрев металла в продуктах неполного сгорания природного газа при $n \sim 0,35$ и содержании в них 1–3% ацетилена; другой путь – использование в качестве контролируемой атмосферы природного газа при его периодической подаче в зону нагрева стали.

На завершающем переделе производства металла – термической обработке – качество нагрева стали особенно важно для эффективности всего металлургического производства. Поэтому в развитых странах около 50% металла при термообработке нагревается в печах с контролируемой атмосферой. В связи с известными достоинствами, обусловленными простотой и экономичностью метода, внутрипечной способ формирования атмосферы путем неполного сжигания природного газа в настоящее время применяют и в термических печах. Так применяется способ предварительного малоокислительного нагрева полосы перед цинкованием и алюминированием в продуктах неполного сгорания природного газа при $n = 0,7\text{--}0,9$. Однако в большинстве случаев контролируемая атмосфера создаётся традиционными способами с использованием различного рода генераторов, катализаторов, азота, аммиака и пр. При получении контролируемых атмосфер с использованием генераторов на 1000 м³ газа расходуется до 100 кг у.т. Кроме того, около 30 кг у.т. расходуется на разогрев этой атмосферы в печи.

Расход топлива или электроэнергии в термических печах в большей степени зависит от садки металла, вида термической обработки, типа печи и расход топлива в таких печах составляет от 25 до 100 кг у.т. В печах с непосредственным обогревом контролируемой атмосферой внутрипечного производства удельный расход топлива на 10–20 кг у.т./т меньше, чем в печах с муфельированием

садки или факела. Применение рециркуляции газов в некоторых случаях приводит к сокращению расхода топлива почти вдвое. Использование прокатного нагрева для термической обработки металла позволяет сэкономить до 50 кг у.т./т. Лазерная термообработка (производится только поверхностный разогрев металла), а также ионная химико-термическая обработка стали, требуют на 20–30 кг у.т./т меньше, чем традиционные процессы, и позволяют получить металл наивысшего качества.

4. ВЭР В СИСТЕМЕ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

4.1. Состав систем теплоэнергоснабжения

- Система теплоэнергоснабжения промышленного предприятия (СТЭС ПП) – единый, взаимосвязанный технически и экономически комплекс, включающий:
- сооружения и установки, обеспечивающие прием, трансформацию и аккумуляцию энергоресурсов и энергоносителей от общегосударственных или районных энергосистем;
- энергетические станции и установки предприятия для централизованной выработки остальных необходимых потребителям предприятия энергоресурсов и энергоносителей, их трансформации и аккумуляции: ТЭЦ, котельные, насосные, компрессорные, воздухоразделительные станции и т.д.;
- утилизационные установки и станции, производящие энергоносители за счет использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) технологического комплекса предприятия: утилизационные ТЭЦ, котлы-утилизаторы (КУ), установки по очистке и повторному использованию сточных вод, по улавливанию и очистке горючих отходов технологических процессов;
- трубопроводные и иные подсистемы, обеспечивающие транспортировку к потребителям предприятия и распределение между ними энергоносителей и энергоресурсов, произведенных его энергетическими станциями и утилизационными установками, а также полученных из общегосударственных или районных энергосистем.

Системы электроснабжения в состав СТЭС ПП не включены, хотя связи с ними учитываются при анализе и оптимизации СТЭС ПП.

Основной целью функционирования СТЭС ПП является обеспечение потребностей технологического комплекса энергией строго определенного качества и с заданным уровнем надежности с помощью набора различных энергоносителей. Система теплоэнерго-

снабжения промышленного предприятия складывается из набора отдельных систем энергоснабжения, каждая из которых производит конкретный вид энергоносителя и является подсистемой СТЭС ПП.

На большинстве промышленных предприятий в состав СТЭС ПП в качестве основных подсистем входят:

- система теплоснабжения;
- система пароснабжения;
- системы водоподведения и водоотведения;
- системы воздухоснабжения;
- система газоснабжения;
- системы снабжения жидким и твердым топливом.
- Во многих случаях к ним добавляются:
- системы обеспечения продуктами разделения воздуха;
- системы кондиционирования воздуха;
- системы производства холода;
- системы производства защитных газов.

Энергетические станции и установки СТЭС ПП, производя несколько видов энергоносителей или производя один, а потребляя другие энергоносители, связывают подсистемы друг с другом и оказывают влияние на режимы и показатели работы каждой из них. Связи между подсистемами возникают и через те технологические аппараты и установки, которые потребляют энергоносители из одних подсистем, а произведенные за счет ВЭР в утилизационных установках иные энергоносители направляют к потребителям через другие подсистемы.

4.2. Обобщенная схема теплоэнергоснабжения промышленного предприятия

Состав систем теплоэнергоснабжения конкретного промышленного предприятия определяется:

- потребностями предприятия для выработки его продукции;
- возможностью теплоэнергоснабжения от внешних источников;
- размерами предприятия и объемами производства.

Поэтому составы систем теплоэнергоснабжения на разных промышленных предприятиях различаются в такой же степени, в какой различны сами промышленные предприятия.

Наиболее полный перечень систем теплоэнергоснабжения может быть отражен в обобщенной системе теплоэнергоснабжения. Состав же систем конкретного предприятия может быть более узким, в зависимости от вышеуказанных причин.

На рис.2 изображена обобщенная схема теплоэнергоснабжения промышленного предприятия.

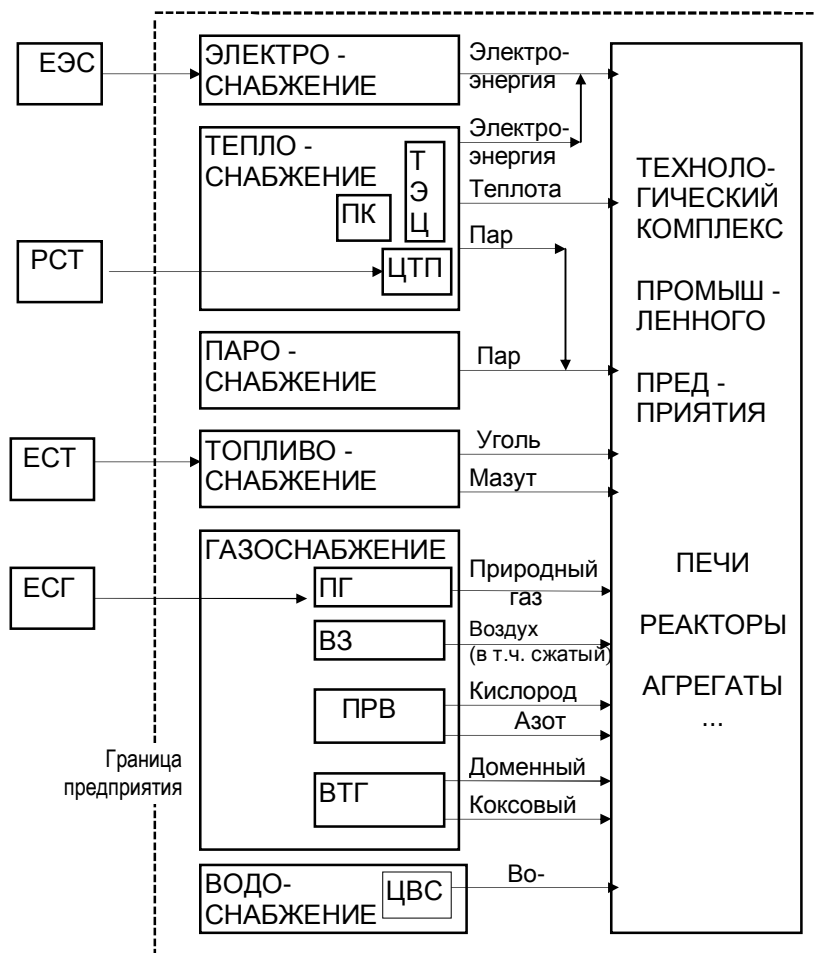


Рис. 2. Обобщенная схема теплоэнергоснабжения предприятия:

ЕЭС – единая система электроснабжения;

РСТ – районная система теплоснабжения;

ЕСГ – единая система газоснабжения;

ЕСТ – единая система топливоснабжения;

ПГ – система снабжения природным газом;

ПРВ – подсистема снабжения продуктами разделения воздуха;

ВТГ – подсистема снабжения вторичными топливными газами

ПК – паровая котельная;

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;

ЦТП – центральный тепловой пункт;

ЦВС – центральная водная станция;

ВЗ – подсистема снабжения воздухом;

Система электроснабжения обеспечивает потребителей промышленного предприятия электрической энергией. Потребители промышленного предприятия обеспечиваются электроэнергией в общем случае от единой системы электроснабжения ЕСТ. Крупные промышленные предприятия могут иметь собственные электростанции (ТЭЦ). Собственные электростанции покрывают только часть нагрузки (например 70%), остальную часть (например 30%) покрывают поставки единой системы электроснабжения. С точки зрения теплоэнергетики важно отметить, что вся собственная электроэнергия промышленных предприятий и свыше 80–85% электроэнергии в ЕЭС вырабатывается на тепловых электростанциях.

Система теплоснабжения обеспечивает промышленное предприятие электроэнергией, теплотой (на водяном или паровом теплоносителе), горячей водой и паром. Электроэнергия, произведенная на ТЭЦ или ПВЭС (паровоздуховых электростанциях), поступает в систему электроснабжения. В общем случае источником теплоты, горячей воды и пара для промышленных предприятий являются внешние Районные системы теплоснабжения РСТ. В состав РСТ могут входить ТЭЦ, паровые или водогрейные котельные, обслуживающие промышленный или городской район электроэнергией, теплотой и паром. Прием энергоносителей от внешних систем на территорию промышленного предприятия осуществляют центральные тепловые пункты ЦТП. На ЦТП осуществляются прием, измерение, регулирование и поддержание параметров теплоты и пара, поступающих на территорию промышленного предприятия от внешней районной системы теплоснабжения РСТ.

Крупные промышленные предприятия могут иметь собственные источники электроэнергии, теплоты и пара.

Собственными источниками электроэнергии, теплоты и пара на промышленном предприятии являются теплоэлектроцентрали ТЭЦ, паровоздуховые электростанции ПВЭС, паровые котельные ПК и другие источники пара и горячей воды. На ТЭЦ вырабатывают все виды энергоносителей: электроэнергию, теплоту и пар. Паровые котельные ПК вырабатывают теплоту и пар. Производимый пар используется как в системах теплоснабжения, так и в системах пароснабжения промышленных предприятий.

Системы пароснабжения снабжают потребителей водяным паром. Источниками в системах пароснабжения могут быть теплоэлектроцентрали ТЭЦ, паровые котельные ПК, районные системы теплоснабжения РСТ через центральные тепловые пункты ЦТП. Дополнительно пар могут поставлять утилизационные источники пара, работающие на вторичных энергоресурсах (ВЭР): котлы-утилизаторы и системы испарительного охлаждения (СИО).

Системы топливоснабжения снабжают промышленное предприятие топливом твердым и жидким, как правило, углем и мазутом. Источником топлива для промышленного предприятия является внешняя общепромышленная единая система топливоснабжения ЕСТ, включающая в себя месторождения угля и нефти, транспортные системы, предприятия нефтехимической переработки.

Системы топливоснабжения промышленных предприятий включают в себя хранилища угля или мазута, транспортные устройства, мазутопроводы, системы подготовки углей к сжиганию.

Системы газоснабжения обеспечивают промышленные предприятия различными газами: воздухом, топливными газами, продуктами разделения воздуха, защитными газами.

Большую группу представляют собой топливные газы. Центральное место здесь занимает природный газ ПГ. Кроме того, многие предприятия побочно производят вторичные топливные газы, наибольший объем среди которых занимают доменный и коксовый газы. Встречаются также такие топливные газы, как ферросплавный, конвертерный, генераторный и др.

Среди продуктов разделения воздуха чаще всего потребляются кислород, азот и аргон.

Обеспечение промышленных потребителей каждым из перечисленных газов осуществляют специальные автономные, независимые системы. Крупнейшими системами газоснабжения на промышленных предприятиях являются системы воздухообеспечения, системы снабжения природным газом, системы доменного газа, системы коксового газа. Важными системами являются системы снабжения продуктами разделения воздуха.

Системы обеспечения воздухом представляют собой целую подсистему общей системы газоснабжения и обеспечивают промышленных потребителей сжатым и вентиляторным воздухом.

Системы водоснабжения обеспечивают промышленное предприятие водой. В своем составе системы технического водоснабжения имеют подсистемы водоподведения и водоотведения, водозаборные и насосные станции, очистные сооружения и устройства охлаждения оборотной воды.

4.3. Использование отработанных ресурсов

Паровые двигатели кузнечных молотов, прессов, штамповальных машин и других механизмов, широко применяющихся на современных промышленных предприятиях, работают на выхлоп с противодавлением от 0,12 до 0,3 МПа, при этом потери теплоты весьма значительны.

Утилизация теплоты отработавшего пара возможна по следующим направлениям:

- теплоснабжение потребителей;
- выработка электроэнергии;
- комбинированное использование пара для снабжения потребителей теплотой и электроэнергией.

В настоящее время разработано много различных схем для использования теплоты отработавшего в промышленности пара. Несмотря на разнообразие, они имеют ряд общих принципов. Так, например, пар после паровых двигателей должен обязательно подвергаться очистке от капель масла и хлопьев сальниковой набивки. В паровых системах теплоснабжения отработавший пар после очистки подается непосредственно потребителям. В крупных, разветвленных и протяженных системах теплоснабжения экономически целесообразнее применять водяную систему теплоснабжения. В этом случае теплоприготовительную установку размещают в непосредственной близости от места выхода отработавшего пара, а потребителям горячая вода подается сетевым насосом. При этом графики выхода отработавшего пара и теплопотребления редко совпадают. В этих случаях необходимо применять паровые аккумуляторы переменного давления.

Целесообразность применения аккумулятора определяется частотой и равномерностью пиков и провалов в графике нагрузки аккумулятора, а также временем его зарядки и разрядки.

Применение аккумуляторов может оказаться целесообразным не только для использования отработавшего пара, но и вообще на промышленных предприятиях с резкоменяющимися графиками потребления пара, например, на заводах сборного железобетона, в масломолочной промышленности. При этом можно ожидать не только уменьшения расхода топлива за счет выравнивания нагрузки котлов, но и уменьшения их числа.

Когда давление отработавшего или вторичного пара недостаточно для требований потребителей, его повышение осуществляется за счет использования механических, абсорбционных или струйных насосных установок. Для повышения давления отработавшего пара в настоящее время больше всего применяются пароструйные компрессоры. Их применение позволяет уменьшить расходы пара за счет частичного использования отработавшего пара. К достоинствам пароструйных компрессоров относятся простота конструкции и невысокая стоимость, к недостаткам – относительно низкий к.п.д. (не более 25%), снижающийся по мере увеличения степени сжатия, и большая зависимость от стабильности параметров пара на входе и производительности.

На отработавшем паре могут работать парозежекционные установки для отсоса различных газов или для создания вакуума. Например, такие установки дают возможность применять в производстве сборного железобетона очень эффективный способ вакуумирования при изготовлении железобетонных изделий. Паровые эжекторы могут быть использованы для интенсификации различных технологических процессов, например, для повышения эффективности выпарных установок.

После механической очистки от масла и других примесей, отработавший пар, в первую очередь, следует использовать для соответствующего покрытия отопительно-вентиляционных, бытовых и других тепловых нагрузок.

Остальной отработавший пар целесообразно использовать для других целей. В некоторых случаях для отопления производственных зданий применяют паровые системы отопления высокого давления (0,1–0,5 МПа).

Пар высокого давления (0,4–0,6 МПа) можно использовать в гражданских зданиях для отопления с устройством комбинированных пароводяных систем с центральным подогревом воды – в пароводяных скоростных водонагревателях.

Отработавший пар высокого давления используется также для горячего водоснабжения промышленных предприятий. Горячую воду при этом получают в подогревателях.

В промышленности широко применяют воздушные системы отопления и воздушные тепловые завесы, образованные с помощью паровых калориферов.

При использовании для теплоснабжения пара из паровых машин и молотов, работающих на обычной смазке, содержание масла в паре достигает 150 мг/кг и более. Наличие масла в паре в таких больших количествах в несколько раз снижает производительность водонагревателей. Кроме того, конденсат такого пара непригоден для питания котлов ТЭЦ. Поэтому необходима очистка пара от масла и других загрязнений.

Лучший способ обезмасливания конденсата – фильтрация его через слой активированного березового или торфяного угля с размером частиц 0,5–1,5 мм. По данным ВТИ, разработавшего и внедрившего этот метод, 1 кг угля может очистить до 30 т конденсата с начальным содержанием масла до 20 мг/кг.

Потребление горячей воды на технологические цели, например, на промывку, принципиально мало, чем отличается от рассмотренной. Температурный и гидравлический режимы работы подающей линии в этом случае должны соответствовать графику технологической нагрузки.

4.4. Методы сведения балансов производственного пара

Расходы производственного пара потребителями сильно изменяются как по сезонам года, так и в пределах месяцев, суток и даже часов. Изменяются в течение суток (часов) и приходы пара от утилизационных установок (УУ), использующих различные ВЭР.

Например, при нормальной работе установок сухого тушения кокса (УСТК) и котлов-охладителей газов (КОГ) сталеплавильных конвертеров минимальный и максимальный приходы пара от этих двух видов УУ составляют соответственно от 45 до 400 т/ч, а от УСТК – 140–190 т/ч. Такие резкие изменения приходов пара от части установок, использующих ВЭР, сильно сказываются на общезаводском балансе пара.

Приходы пара от УУ прокатных цехов могут сильно колебаться из-за изменений режимов работы нагревательных печей и прокатных станов. Так, если количество нагретого в печах металла в данный момент превышает по тем или иным причинам потребность стана, то резко снижают количество топлива, сжигаемого в печах. Соответственно сильно снижается паропроизводительность КУ, установленных за этими печами.

При текущих ремонтах прокатных станов, которые могут длиться от нескольких часов до нескольких суток, паропроизводительность КУ падает, например, от 300 т/ч практически до нуля. Такое снижение производительности сильно влияет на баланс производственного пара по заводу.

Со снижением производительности уменьшается выход пара из систем испарительного охлаждения (СИО) печей, который у крупных станов составляет до 100 т/ч. Это снижение суммируется с уменьшением поступления пара от КУ этих печей.

Коксовые батареи на многих заводах планово-периодически останавливают примерно на сутки для ремонта обслуживающих печи механизмов.

Аналогичные колебания паропроизводительностей КУ и СИО в пределах суток (часа) наблюдаются и на УУ других технологических агрегатов. Поэтому для обеспечения надежного, бесперебойного пароснабжения потребителей совершенно недостаточно свести баланс завода по средним значениями расходов и приходов за месяц и тем более за год, а надо обязательно учитывать реальные графики расходов пара в течение месяца, суток, часа. Баланс пара должен сходиться в любой, хотя бы и короткий, отрезок времени.

Практически на всех предприятиях различных отраслей промышленности есть потребители производственного пара, для которых перерывы в подаче пара или резкое уменьшение его подачи, а также снижение давления, недопустимы. У этих потребителей снижение давления пара, а следовательно и температуры в теплообменниках, может резко снизить производительность установки

по основному технологическому продукту и даже приостановить течение технологического процесса. При этом может снижаться качество продукции и даже наблюдается ее порча. Снижение давления пара в системе общезаводских паропроводов наблюдается при недостаточном поступлении в него пара. Вспомогательные механизмы, работающие на паре, могут при этом не обеспечивать работу технологического агрегата, который они обслуживают.

Наряду с такими потребителями могут быть агрегаты и установки, которые менее чувствительны к не слишком продолжительным перерывам в подаче пара и снижениям его параметров. Это обстоятельство можно учитывать при сведении балансов пара по заводу, если полное его сведение по каким-либо причинам связано со слишком большими затратами. Для сведения балансов производственного пара по заводу в любой отрезок времени необходимо иметь резервные, мобильные пиковые парогенерирующие мощности или применять другие средства компенсации дебаланса. Необходимо также предусматривать возможности использования периодических избытков пара, во избежание вынужденного их сброса.

На первый взгляд представляется наиболее простым и целесообразным компенсировать дебалансы производственного пара отборным паром турбин ТЭЦ. Режимы оборудования ТЭЦ не зависят от графиков работы технологических агрегатов, так как ТЭЦ работает на топливе и режимы ее работы могут поэтому устанавливаться в зависимости от потребности пара для покрытия дебаланса в каждый данный отрезок времени. Однако это оказывается далеко не всегда экономически оправданным, так как работа турбины с отбором пара дает экономию топлива (а тем более приведенных затрат) только при достаточной загрузке ее отборов в течение года. При недостаточной годовой загрузке отбора теплофикационная турбина работает с перерасходом топлива и особенно приведенных затрат по сравнению с работой при раздельном варианте КЭС плюс котельная [2].

4.5. Аккумулирование производственного пара

Одним из путей сведения балансов производственного пара является его аккумулирование в периоды избыточного поступления с отдачей пара во время, когда его не хватает.

Рассмотрим области возможного экономичного применения аккумуляторов пара.

Если в данном производстве дефициты пара невелики по абсолютным размерам (несколько десятков тонн в час) и длятся недолго – доли часа, то возможно применение пароводяных аккумуляторов. Так, если временный дефицит производственного пара равен 50 т/ч и длится 0,5 ч, то аккумулятор должен выдать 25 т/ч

пара. Размеры такого аккумулятора могут составить $87,5 \text{ м}^3$, что технически вполне допустимо и приемлемо.

В ряде производств, в частности на металлургических заводах, дефициты производственного пара могут составлять сотни тонн в час и длиться многие часы и даже несколько суток. В этих случаях аккумуляторные установки достигают неприемлемых размеров, требуют больших капиталовложений и расходов металла. Поэтому применение только аккумуляторной установки не может решить задачи балансирования расходов и приходов производственного пара для крупного завода. Установка может применяться как вспомогательное устройство для покрытия кратковременных дефицитов пара в сочетании с другими компенсирующими установками.

На металлургических заводах паровые аккумуляторы получили ограниченное распространение, в основном для выравнивания приходов пара от котлов – охладителей сталеплавильных конвертеров, у которых перерывы между продувками составляют обычно 30–5 мин [2].

4.6. Выравнивание паропроизводительности утилизационных установок

Дебалансы производственного пара возникают в значительной степени из-за неравномерности выдачи пара утилизационными установками, следовательно, одним из путей поддержания баланса пара по заводу является выравнивание паропроизводительности УУ. Для большинства УУ такое выравнивание может быть достигнуто путем так называемой подтопки, то есть сжиганием в УУ топлива.

Обычно КУ обогревается отходящими газами технологического агрегата, например, нагревательной печи. Когда расход и температура отходящих газов уменьшаются, паропроизводительность КУ соответственно снижается. Повысить ее до нужного значения можно путем сжигания топлива в подтопочном устройстве и подмешивания горячих газов из подтопочного устройства к отходящим газам из печи.

Подтопкой можно обеспечить номинальную паропроизводительность КУ и при остановленной печи и даже превысить ее. В обоих случаях дополнительный пар получается за счет сжигания топлива, как в обычных производственных или пиковых котельных. Соответственно экономичность применения подтопки определяется к.п.д., с которым используется дополнительное топливо, а также годовым числом часов работы подтопочного устройства [2].

4.7. Балансы горючих ВЭР

Общие положения

На многих предприятиях, в том числе на заводах черной и цветной металлургии, нефтеперерабатывающих, химических, а также заводах ряда других отраслей промышленности, в процессе производства выделяются горючие газы, которые, как правило, используются на этих же предприятиях в качестве топлива.

Как видно из табл. 17, на металлургических заводах доля технологических горючих газов составляет более 50% общего годового потребления топлива заводом, а по абсолютным цифрам выход горючих газов на одном заводе эквивалентен нескольким миллионам тонн условного топлива в год. Поэтому возможно более полное использование горючих технологических газов имеет большое значение. Однако эффективное их использование связано с целым рядом серьезных трудностей. Эти газы, как правило, токсичны, содержат много пыли и вредных веществ.

Таблица 17

Годовой топливный баланс действующего
металлургического завода с полным циклом производства,
годовое потребление условного топлива, тыс. т

Потребители	До- мен- ный газ	Коксо- вый газ	При- родный газ	Твер- дое топли- во	Жид- кое топли- во
Доменные печи (вдувание)	-	-	1170	-	-
Воздухонагреватели доменного цеха	694	10	4	-	-
Коксохимическое производство	515	156	-	-	-
Конвертерные цехи	-	98	91	-	-
Электросталеплавильный цех	8	4		2	
Прокатные цехи	172	207	780	-	-
Агломерационная фабрика	77	180	-	291	-
Известковое и огнеупорное производства	-	80	304	-	-
Азотно-туковое производство	-	483	-	-	-
Энергетические установки (ТЭЦ, пиковые котельные и др.)	950	265	186	71	-
Прочие потребители	60	50	20	-	305
Потери (проектные)	80	8	13	-	-
Всего	2556	1541	3170	362	305

Графики выхода газов, а также их химический состав, определяются ходом технологического процесса и, в ряде случаев, изменяются по стадиям этого процесса, а иногда их выход вообще периодичен с амплитудой расхода от нуля до 100%. Между тем потребители технологического газа требуют определенного графика его поступления, который обычно не синхронен с графиком его выхода. Газ должен быть и возможно более стабильным по составу, очищенным от пыли и некоторых вредных примесей (сернистых соединений и др.).

Из-за этих трудностей некоторые технологические газы используются пока недостаточно (например, газы кислородных конвертеров) [2].

4.8. Методы сведения балансов доменного и коксового газов

Общие методы балансирования горючих газов

Наибольший интерес представляют случаи нерегулярных избытков топливных газов в соответствующих сетях доменного или коксового газов, так как они приводят к повышению давления в сетях сверх допустимого и могут вынуждать к сбросу и потерям топливных газов, то есть к ухудшению общей энергоэффективности промышленного предприятия.

В самом общем виде избытки топливных газов могут быть сбалансированы:

- перераспределением потоков газов по потребителям;
- прочностными свойствами сетей трубопроводов коксового или доменного газов (до определенного предела);
- сбросом газов из сети для использования буферными потребителями;
- сбросом и дожиганием газов на свече в атмосфере.

Метод перераспределения потоков газов по потребителям отличается высокой эффективностью, требует только оперативно-диспетчерского управления и не требует никаких затрат на сооружение установок и трубопроводов. Этот метод ограничен только суммарной одновременной потребностью всех потребителей сети и может применяться при несовпадении графиков потребления топливного газа у различных потребителей, особенно мощных. При одновременном достижении максимума потребления у всех потребителей и увеличении выхода топливного газа от источников, метод теряет силу и должен уступить место другим методам балансирования. Метод должен быть обеспечен конфигурацией сети, так как оперативное перераспределение потоков весьма ограниче-

но в простых тупиковых сетях, а наиболее эффективно может быть применено в сетях с кольцевыми участками.

Использование прочностных свойств газопроводов для компенсации избытков газов является кратковременным, вынужденным и крайне нежелательным методом, так как вступает в противоречие с нормами эксплуатации газопроводов и может привести к преждевременному выходу газопровода из строя, уменьшению межремонтных сроков, снижению газоплотности и аварийным ситуациям.

Наиболее эффективно в энергетическом и технологическом отношении применение буферных потребителей избытков топливных газов. Буферные потребители – это установки, способные принимать нерегулярные количества топливных газов в произвольное время и производить энергетическую или технологическую продукцию. Буферными потребителями могут быть основные энергетические или технологические установки предприятия, а в отдельных случаях – специальные установки для приема избытков топливных газов. Высокая эффективность метода буферных потребителей определяется тем, что избытки собственного топлива предприятия используют на производство дополнительной энергетической или технологической продукции и замещают покупное топливо для этих целей.

Наиболее часто применяются энергетические буферные потребители, в качестве которых применяются котельные агрегаты тепловых электростанций промышленных предприятий, котлы паровых и водогрейных котельных, многочисленные цеховые котлы-утилизаторы различных типов. Общая эффективность применения энергетических буферных потребителей снижается тем, что они производят не основную продукцию промышленного предприятия, а дополнительную, которая, как правило, не может быть продана наравне с основной продукцией.

Наиболее эффективно применение технологических буферных потребителей, в качестве которых могут выступать основные технологические установки предприятия, выпускающие товарную продукцию (или полупродукты для ее производства): печи, реакторы, конвертеры и т.д.

Метод применения буферных потребителей может требовать больших затрат на их сооружение и эксплуатацию, а также на изменение конфигурации газовой сети для обеспечения подвода топливного газа к буферному потребителю. Без соответствующих подводов газов от топливных газопроводов буферные свойства потребителей не могут быть использованы.

Сброс топливных газов с дожиганием их на свече в атмосфере является вынужденным мероприятием и снижает эффективность энергоиспользования на предприятии.

Особенности балансирования в сетях доменного и коксового газов определяются их топливными свойствами, объемами и графиками их выходов, количеством и мощностью источников.

Доменный газ

Количество доменного газа, образующегося на металлургических заводах, весьма велико. Так, на заводе, топливный баланс которого приведен в таблице, годовой выход доменного газа эквивалентен по теплоте 2250 тыс. т условного топлива. При номинальной теплоте сгорания доменного газа 4186,8 кДж/м³ такому годовому выходу соответствует расход газа около 2 млн м³/ч.

При установившейся бесперебойной работе доменных печей график выхода газа в течение суток должен быть практически ровным. Однако и при таком режиме работы ДП в течение подавляющей части суточного времени наблюдается целый ряд кратковременных, но иногда значительных изменений выходов газа, например, из-за смены перегоревших фурм, неполадок в загрузочном устройстве и др. Снижение выходов газа длится при этом от 10–20 мин и более. Обычно несколько доменных печей работают на общую сеть доменного газа.

Размеры кратковременных снижений выходов газа из отдельной печи весьма различны, от 20–30% до практически полного прекращения выхода. На крупных доменных печах размер кратковременных снижений выхода газа составляет сотни тысяч кубических метров. Между тем большинство технологических потребителей доменного газа не допускает даже кратковременных перерывов в подаче топлива, что должно учитываться при сведении заводского баланса доменного газа. Кроме кратковременных изменений выходов газа могут быть и длительные изменения.

Доменные печи и их вспомогательные установки нуждаются в текущих и планово-предупредительных ремонтах. При текущих ремонтах ДП прекращают выдачу доменного газа на многие часы, при капитальных ремонтах выход газа прекращается на 1,5–3 месяца.

Теоретически потребление доменного газа должно быть практически ровным, однако и в потреблении наблюдаются значительные колебания. Различные технологические печи постоянно изменяют количество потребляемого газа по разным причинам. Так, режимы работы печей прокатных станов определяются режимами работы станов, которые по различным причинам могут значительно снижать свою производительность и даже останавливаться.

У других печей, например мартеновских, потребление газа изменяется по периодам плавки. Доменные воздухонагреватели являются аппаратами периодического действия, которые потребляют газ только во время разогрева. Во время переключений доменных воздухонагревателей с разогревов на дутье и обратно на 10–15 мин снижается потребление доменного газа воздухонагревателями одной печи на 40–60 тыс. м³/ч.

Таким образом как приход, так и расход доменного газа подвержены кратковременным, а также сравнительно длительным колебаниям, причем, эти колебания происходят нерегулярно и несинхронно, что вызывает разбалансировку в приходе и расходе газа. В связи с этим необходимы мероприятия, позволяющие обеспечить бесперебойное снабжение газом ответственных потребителей в периоды снижения его выхода. В свое время были попытки использовать для этих целей газгольдеры, то есть аккумуляторы газа. Крупные газгольдеры из-за инерционности плохо воспринимают резкие, до 150–300 тыс. м³/ч, толчкообразные избытки газа и плохо компенсируют пики его потребления.

В результате установка газгольдеров решает вопрос лишь частично. Сохраняются потери газа, а давление газа в магистральных газопроводах существенно колеблется. Кроме того, газгольдеры нежелательны с точки зрения техники безопасности вследствие токсичности газа и потенциальной возможности его взрыва. Так, например, на одном из заводов были сооружены два газгольдера вместимостью по 100000 м³. Позже они были демонтированы, так как практически все годы не работали. За рубежом газгольдеры доменного газа также распространения не получили.

В настоящее время вопросы балансирования доменного газа решают, как правило, применением буферных потребителей, в качестве которых используют паровые котлы ТЭЦ. Когда приход газа превышает среднее его значение, сброс газа в котлы увеличивается. При нехватке газа сброс его в котлы соответственно уменьшается и компенсируется увеличением количества сжигаемого топлива. При этом способе балансирования между производственными потребителями распределяется только 75–85% среднего выхода газа (так называемый гарантированный выход), а 15–25% являются постоянными избытками газа, подаваемыми на ТЭЦ.

Недостатком описанного способа является вынужденное использование значительного количества доменного газа в качестве котельного топлива, в то время как он может эффективно использоваться в целом ряде технологических агрегатов, особенно в смеси с коксовым газом, снижая потребность в природном газе или жидком топливе. Примерно 67% топлива, расходуемого нагрева-

тельными печами прокатных цехов, составляет природный газ (780 тыс. т условного топлива в год). Известковое и огнеупорное производства потребляют природного газа около 300 тыс. т условного топлива в год, то есть около 80% всей потребности этих цехов в топливе.

Практика показала, что и при большой средней доле сброса доменного газа на ТЭЦ не удастся избежать заметных его потерь, которые составляют от 3–5% на лучших заводах, до 11–13% на некоторых крупных (даже новых) заводах. Объясняется это тем, что совместная работа паровых котлов на газе и угле при постоянных изменениях доли газа и угля в общем расходе топлива связана с рядом следующих трудностей и недостатков:

доменный газ имеет значительно более низкую температуру сгорания, чем уголь, ниже у него и радиационная способность факела. В результате экранные поверхности нагрева котла воспринимают меньшую долю теплоты топлива, а в современных котлах доля теплоты, воспринимаемой радиационными поверхностями, весьма велика;

из-за большого содержания в доменном газе азота, количество его продуктов сгорания (на единицу отдаваемой теплоты) значительно больше, чем у угля, что изменяет условия работы конвективных поверхностей нагрева. Растет перегрев пара, причем, при большой доле доменного газа рост настолько велик, что стандартное регулирование перегрева пара оказывается недостаточным;

перегружаются или не справляются с отсосом дымовых газов дымососы. Часто приходится ограничивать паропроизводительность котла до 70–80% номинальной;

растет химический недожог угля, особенно при углях с малой реакционной способностью;

сама процедура значительных изменений долей доменного газа и угля (зажигание одних горелок, гашение других и др.) с подналадкой режимов работы котла требует известного времени.

Поэтому ТЭЦ может эффективно принимать значительные избытки газа лишь через 15–20 мин подготовки [2].

Коксовый газ

Выход коксового газа характеризуется большой равномерностью, особенно по сравнению с доменным газом. Это объясняется большим количеством источников газа: до 65 камер в каждой из нескольких коксовых батарей.

Тем не менее, выход коксового газа также подвержен колебаниям расхода из-за снижения производительности, планово-предупредительных и аварийных остановок.

С другой стороны, потребители коксового газа также изменяют потребляемый расход газа, часто очень существенно. Например, нагревательные печи прокатного производства, потребляющие большое количество коксового газа из сети, значительно снижают его потребление при перерывах в подаче металла в прокатной технологической линии.

В результате несоответствия графиков выхода и потребления коксового газа растет давление в сети коксового газа, что может привести к сбросу и дожиганию газа на свече в атмосфере, то есть к потерям ценного топливного ресурса.

По сравнению с доменным газом, выход коксового газа на порядок меньше, а теплота и температура сгорания его значительно выше, то есть в том же объеме коксового газа количество и качество энергии больше. Это делает более оправданным применение газгольдеров, чем в случае доменного газа. В этом случае газгольдеры, как накопители коксового газа, могут аккумулировать избыточный газ, предотвращая чрезмерное повышение давления в сети коксового газа. В период падения давления газгольдеры могут достаточно равномерно выдавать коксовый газ в сеть и покрывать отрицательный дебаланс газа. Следует заметить, что применение газгольдеров на практике весьма ограничивается взрывоопасностью большого количества накопленного газа.

Другим методом сведения балансов коксового газа является применение буферных потребителей как энергетических, так и технологических. К энергетическим буферным потребителям можно отнести все котельные агрегаты предприятия на ТЭЦ, ПВЭС, производственно-отопительных и водогрейных котельных, котлы-утилизаторы. К технологическим буферным потребителям можно отнести основные технологические агрегаты предприятия, выдающие технологические полупродукты и конечные продукты.

Применение коксового газа в энергетических целях оправдано высоким качеством этого топлива, что позволяет добавлять сравнительно небольшое количество коксового газа к основному топливу и практически не изменять тепловой режим работы котла, то есть избежать всех тех проблем, которые существуют для доменного газа. Буферным потребителем коксового газа могут быть котлы-утилизаторы кислородных конвертеров (с дожиганием), работающие с циклом 45 мин, из которых 15 мин через них идут конвертерные газы, а в остальные 30 мин им требуется газовое топливо на подтопку в ожидании очередного выхода конвертерных газов. Подтопка требуется и в методических печах прокатного производства, оборудованных котлами-утилизаторами в периоды пе-

перывов в подаче металла на нагрев, при этом на коксовом газе вырабатывается водяной пар.

Однако высококачественное топливо можно с гораздо большей эффективностью для предприятия использовать на технологические цели. Температура горения коксового газа выше, чем доменного, но главное – выше, чем природного газа, на котором работают все основные технологические агрегаты промышленных предприятий. Это означает, что коксовый газ, который является собственным резервом промышленного предприятия, может весьма эффективно заменять природный газ, который предприятие получает со стороны и за который надо платить.

Так, например, в основных технологических высокотемпературных процессах в требованиях к топливу на первое место выходит как раз температура горения, а не теплота сгорания. Коксовый газ имеет меньшую теплоту сгорания, чем природный газ, но более высокую температуру горения, что и позволяет эффективно заменять им природный газ, получая экономию на покупном топливе.

В качестве буферных технологических потребителей наибольший интерес представляют те из них, которые могут:

- принимать избытки газа в произвольное время и в произвольном количестве;

- имеют минимальный пусковой период;

- производят технологическую продукцию, которая может быть складирована.

На металлургических предприятиях этим требованиям больше всего отвечают процессы и установки нагрева, обжига и отчасти сушки или плавления.

Например, нагрев металлолома для конвертерного процесса требует минимального пускового времени и может работать в произвольное время. Аналогично работают ломоплавильные агрегаты для сталеплавильных конвертеров, использующие нерегулярные выходы конвертерных газов (с той лишь оговоркой, что расплавленный лом должен быть тут же переработан).

На предприятиях черной металлургии широко распространены обжиговые процессы: в значительных количествах обжигаются известняк, железорудные материалы, огнеупорные изделия, при этом обожженная продукция может складироваться.

Сушка и обжиг зернистых шихт, огнеупорных кладок и футеровок также могут выступать в качестве буферных потребителей, особенно, если эти процессы требуют высокой температуры. Высокотемпературная сушка оправдывает применение коксового газа.

Разумеется, буферные потребители коксового газа должны быть обеспечены подводами газа от сети так, что сведение балансов коксового газа начинается с обеспечения конфигурации сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, вторичные энергетические ресурсы играют большую роль в энергообеспечении промышленных предприятий, сокращая закуп товарного топлива и электроэнергии, что дает ощутимый экономический эффект.

Роль ВЭР может быть наиболее полно оценена только при системном исследовании общего промышленного комплекса предприятия, включающего как технологическую, так и энергетическую его части.

Эффективное использование ВЭР может дать значительные энергетический и экономический эффекты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куперман Л.И., Романовский С.А., Сидельковский Л.Н. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности. – Киев: Выща школа, 1986. – 303 с.
2. Шульц Л.А. Элементы безотходной технологии в металлургии: учеб. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1991. – 174 с.
3. Семененко Н.А. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование. – М.: Энергия, 1968. – 296 с.
4. Теплоэнергетика металлургических заводов: учебник для вузов / Розенгарт Ю.И., Мурадова З.А., Теворовский Б.З. и др. – М.: Металлургия, 1985. – 303 с.
5. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты / А.П.Воинов, В.А.Зайцев, Л.И.Куперман, Л.Н.Сидельковский – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
6. Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов (Экономия топлива и электроэнергии) / Егоричев А.П., Лисиенко В.Г., Розин С.Е., Щелоков Я.М. – М.: Металлургия, 1990. – 149 с.
7. Сазанов Б.В., Ситас В.И. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.: илл.
8. Михайлов В.В., Гудков Л.В., Терещенко А.В. Рациональное использование топлива и энергии в промышленности. – М.: Энергия, 1978. – 224 с.; илл.
9. Толочко А.И., Филиппов А.И., Филиппев О.В. Очистка технологических газов в черной металлургии. – М.: Металлургия, 1982. – 280 с.

10. Проблемы использования вторичных энергоресурсов в связи с перестройкой работы в черной металлургии / МЧМ СССР. – М.: Металлургия, 1989. – 96 с.
11. Бережинский А.И., Циммерман А.Ф. Охлаждение и очистка газов кислородных конвертеров. – М.: Металлургия, 1983. – 272 с.
12. Металлургия чугуна / Вегман Е.Ф., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С., Клемперт В.М. – М.: Металлургия, 1989. – 512 с.
13. Даньшин В.В., Черноусов П.И. Справочник рабочего доменного цеха: справ. издание. – Челябинск: Металлургия, Челяб. отделение, 1989. – 320 с.
14. Городецкий Я.И., Пустовар В.С., Филиппев О.В. Система испарительного охлаждения металлургических агрегатов. – М.: Металлургия, 1987. – 272 с.
15. Кудрин В.А. Металлургия стали: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1989. – 560 с.
16. Якушев А.М. Справочник конвертерщика. – Челябинск: Металлургия, Челяб. отделение, 1990. – 448 с.
17. Попандопуло Н.К., Михневич Ю.Ф. Непрерывная разливка стали. – М.: Металлургия, 1990. – 296 с.
18. Воскобойников В.Г. Общая металлургия. – М.: Металлургия, 1985. – 479 с.
19. Картавцев С.В. Теплоэнергетические системы и энергетические балансы промышленных предприятий: учеб. пособие. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 156 с.
20. Картавцев С.В. Природный газ в восстановительной плавке: СВС и ЭХА: монография. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 188 с.
21. Строгонов К.В., Картавцев С.В. Жидкая сталь. Использование теплоты и скоростная разливка: монография. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – 147 с.
22. Нешпоренко Е.Г., Картавцев С.В. Вопросы энергоресурсосбережения при извлечении железа из руд: монография. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – 153 с.
23. Картавцев С.В., Нешпоренко Е.Г. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб. пособие. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – 119 с.
24. Картавцев С.В. Интенсивное энергосбережение и технический прогресс черной металлургии. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – 311 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ – ПЕРВОИСТОЧНИК ВЭР	5
1.1. Уголь	7
1.2. Нефть	9
1.3. Ядерные ресурсы	12
1.4. Природный газ	14
2. ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ	19
2.1. Общие сведения по ВЭР	19
2.2. Классификация ВЭР	19
2.3. Источники и потенциал ВЭР	22
2.4. Системы вторичных энергоресурсов	23
2.5. Основные направления использования ВЭР	24
3. ВЭР ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ	25
3.1. Производство агломерата	25
3.2. ВЭР. Производство железорудных окатышей	27
3.3. Производство кокса	28
3.4. Энергетика доменного производства	31
3.5. Производство стали	37
3.6. Непрерывная разливка	43
3.7. Прокатное производство	46
4. ВЭР В СИСТЕМЕ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕД- ПРИЯТИЯ	52
4.1. Состав систем теплоэнергоснабжения	52
4.2. Обобщенная схема теплоэнергоснабжения про- мышленного предприятия	53
4.3. Использование отработанных ресурсов	56
4.4. Методы сведения балансов производственного пара	59
4.5. Аккумулирование производственного пара	60
4.6. Выравнивание паропроизводительности утили- зационных установок	61
4.7. Балансы горючих ВЭР	67
4.8. Методы сведения балансов доменного и коксо- вого газов	63
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	70